

**FRIEDA SAICLA BARROS**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CHUMBO EM FORMA DE PÓ EM  
COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E COMO REVESTIMENTO EM  
SUPERFÍCIES METÁLICAS PARA SEREM APLICADOS EM  
INSTALAÇÕES RADIOLÓGICAS**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Doutor. Área de concentração: Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

Curitiba-PR  
2009

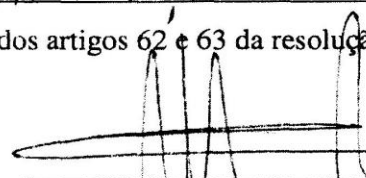


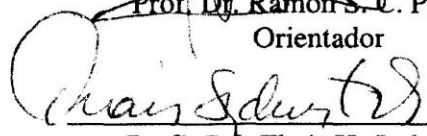
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Setor de Tecnologia

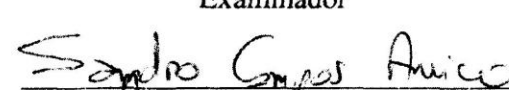
**RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO**

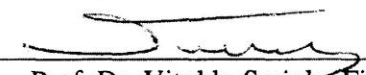
Aos vinte e dois dias do mês de junho de 2009, no auditório do CESEC - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas, coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, a Banca Examinadora para a trigésima segunda defesa de tese de doutorado na área de concentração: Matérias Poliméricos, Cerâmicos, Metálicos, Compósitos e Gasosos. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia, foi constituída pelos professores doutores: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho (UFPR/LACTEC), Thais H. Sydenstricker (UFPR), Ramon S. C. Paredes (UFPR), Joel Mesa Hormaza (UNESP), Sandro C. Amico (UFRGS). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **FRIEDA SAICLA BARROS** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada **“UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CHUMBO EM FORMA DE PÓ EM COMPOSITOS POLIMÉRICOS E COMO REVESTIMENTO EM SUPERFÍCIES METÁLICAS, PARA SEREM APLICADOS EM INSTALAÇÕES RADIOLÓGICAS”**. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APPROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 62 e 63 da resolução 62/03 de 22.07.2003).

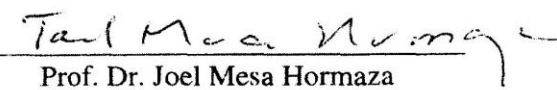
Curitiba, 22 de junho de 2009.

  
Prof. Dr. Ramon S. C. Paredes  
Orientador

  
Prof. Dr. Thais H. Sydenstricker  
Examinador

  
Prof. Dr. Sandro C. Amico  
Examinador

  
Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho  
Examinador

  
Prof. Dr. Joel Mesa Hormaza  
Examinador

*Queremos saber*

*Queremos saber  
O que vão fazer  
Com as novas invenções  
Queremos notícia mais séria  
Sobre a descoberta da antimatéria  
E suas implicações  
Na emancipação do homem  
Das grandes populações  
Homens pobres das cidades  
Das estepes, dos sertões*

*Queremos saber  
Quando vamos ter  
Raio laser mais barato  
Queremos de fato um relato  
Retrato mais sério  
Do mistério da luz  
Luz do disco voador  
Pra iluminação do homem  
Tão carente e sofredor  
Tão perdido na distância  
Da morada do Senhor*

*Queremos saber  
Queremos viver  
Confiantes no futuro  
Por isso se faz necessário  
Prever qual o itinerário da ilusão  
A ilusão do poder  
Pois se foi permitido ao homem  
Tantas coisas conhecer  
É melhor que todos saibam  
O que pode acontecer*

*Queremos saber  
Queremos saber  
Todos queremos saber*

(Música e letra: Gilberto Gil, 1976)

## ***Agradecimentos***

Ao Criador, pela vida.

Aos meus pais, por minha criação.

Ao Leandro L. Zagonel, meu esposo, companheiro e incentivador da minha caminhada.

Ao Felipe B. Zagonel, meu filho, que nasceu durante esta jornada.

Ao professor Ramón Sigifredo Cortés Paredes, pela orientação deste trabalho e por sua confiança.

Ao Gabriel P. Souza, pela orientação inicial deste trabalho.

Ao professor Carlos Marcus G. S. Cruz, pela orientação e amizade.

À Lucia de Fátima C. Botelho, por sua amizade e companheirismo.

À Maria del Consuelo Doval Rozares, amiga de todas as horas.

À Elaine C. De Azevedo, por sua ajuda nas medições.

À Joceli da Guia Chandelier, por sua ajuda na área de Aspersão Térmica.

À equipe do LAMIR – Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da UFPR.

À equipe do LaMats – Laboratório de Materiais e Tratamentos Superficiais da UFPR.

Ao Sergio Henke, responsável pelo Laboratório de Materiais do LACTEC.

À equipe do Laboratório de Materiais – Vitoldo Swinka Filho e Walmor C. Godoy, pela ajuda nos experimentos.

Ao Danyel Scheidegger Soboll, pela ajuda nas medições no Hospital Erasto Gaetner.

Ao Hospital Erasto Gaetner, pela liberação da Sala de Radioterapia.

Ao IEE-USP, pela liberação do Laboratório de Serviço Técnico de Aplicações Médico Hospitalares.

Aos amigos do IEE-USP: Marco A. G. Pereira, Denise Y. Nersissian e Paulo R. Costa, pelo acolhimento e apoio.

Aos amigos do DAFIS-UTFPR: Sara R. O. Moretto, Diógenes Vasconcelos, Cristóvão Rincoski e Josmaria L. Moraes, sempre prontos a me ajudar.

Aos demais colegas do DAFIS e à Direção da UTFPR, aqui não citados nominalmente, mas que me apoiaram e incentivaram a realizar este trabalho.

À empresa Rondopar Energia Acumulada Ltda., pelo fornecimento de materiais.

À Fundação Araucária, pelo apoio financeiro.

Às pessoas que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

A todos, muito obrigada.



## SUMÁRIO

|  |              |
|--|--------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>  | <b>ix</b>    |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>  | <b>xiv</b>   |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>  | <b>xvi</b>   |
| <b>RESUMO .....</b>  | <b>xviii</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>xix</b>   |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>     |
| <b>1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA .....</b>   | <b>1</b>     |
| <b>1.2 OBJETIVOS .....</b>   | <b>3</b>     |
| 1.2.1 OBJETIVO GERAL .....   | 3            |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 3            |
| <b>1.3 JUSTIFICATIVA .....</b>   | <b>3</b>     |
| <b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>                                     | <b>5</b>     |
| <b>2.1 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....</b>  | <b>5</b>     |
| 2.1.1 LEGISLAÇÃO, NORMAS TÉCNICAS E RECOMENDAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS ..... | 5            |
| 2.1.2 NORMAS TÉCNICAS E RECOMENDAÇÕES APLICADAS À PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....       | 7            |
| 2.1.3 GRANDEZAS E UNIDADES DE MEDIDAS DA RADIAÇÃO .....                            | 9            |
| 2.1.3.1 Grandezas e Unidades de Uso Geral .....                                    | 9            |
| 2.1.3.1.1 <i>Grandezas Radiométricas</i> .....                                     | 10           |
| 2.1.3.1.2 <i>Grandezas Dosimétricas</i> .....                                      | 11           |
| 2.1.3.2 Grandezas e Unidades Usadas em Proteção Radiológica .....                  | 13           |
| 2.1.3.2.1 <i>Grandezas de Proteção</i> .....                                       | 14           |
| 2.1.3.2.2 <i>Grandezas Operacionais para Monitoração de Área</i> .....             | 15           |
| 2.1.4 RAIOS X .....  | 16           |
| 2.1.4.1 Camada Semirredutora e Intensidade da Radiação Transmitida .....           | 21           |
| 2.1.4.2 Atenuação de um Feixe de Raios X .....                                     | 22           |
| 2.1.4.3 Energia Efetiva .....  | 23           |
| 2.1.5 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA .....                          | 23           |
| 2.1.6 RAIOS GAMA .....   | 25           |
| 2.1.7 FATORES QUE INTERFEREM NA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....                         | 25           |
| 2.1.8 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE BARREIRAS PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....           | 26           |
| 2.1.9 INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE CÁLCULO .....                                   | 27           |
| 2.1.10 FUNÇÃO CUSTO – OBRA CIVIL .....   | 28           |
| <b>2.2 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO .....</b>                        | <b>28</b>    |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2.3 OBTENÇÃO DO CHUMBO RECICLADO .....</b>                               | <b>31</b> |
| 2.3.1 CHUMBO .....  | 31        |
| 2.3.2 RECICLAGEM DE BATERIAS AUTOMOTIVAS – BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO .....   | 34        |
| 2.3.2.1 Processo de Reciclagem de Baterias Automotivas .....                | 36        |
| 2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS COM RELAÇÃO AO MEIO AMBIENTE ..... | 37        |
| <b>2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS .....</b>                                       | <b>38</b> |
| 2.4.1 MATRIZES POLIMÉRICAS USADAS NA PESQUISA .....                         | 40        |
| 2.4.1.1 Borracha de Silicone .....  | 40        |
| 2.4.1.2 Resina de Poliéster .....   | 42        |
| <b>2.5 ASPERSÃO TÉRMICA .....</b>   | <b>43</b> |
| 2.5.1 PROCESSO UTILIZADO NA PESQUISA - Aspersão à Chama - FS .....          | 48        |
| <b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                               | <b>51</b> |
| <b>3.1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>3.2 MATERIAIS .....</b>  | <b>52</b> |
| 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DOS MATERIAIS .....                    | 53        |
| 3.2.1.1. Análise Química por Fluorescência de Raios X .....                 | 53        |
| 3.2.1.2. Análise química por Energia Dispersiva de Raios X (EDS) .....      | 53        |
| 3.2.1.3 Análise Mineralógica .....  | 54        |
| 3.2.1.4 Análise Granulométrica .....  | 54        |
| 3.2.1.5 Análise Morfológica .....   | 54        |
| 3.2.1.6 Análise Térmica .....   | 54        |
| 3.2.1.7 Densidade do Resíduo de Chumbo na Forma de Pó (experimental) .....  | 55        |
| 3.2.1.8 Densidade do Silicone e do Poliéster (experimental) .....           | 55        |
| 3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS .....                      | 56        |
| 3.2.2.1 Ensaio de Dobramento .....  | 56        |
| 3.2.2.2 Rugosidade .....  | 57        |
| 3.2.2.3 Dureza Vickers .....  | 57        |
| 3.2.2.4 Espessura Média do Revestimento .....                               | 58        |
| 3.2.3 COMPOSIÇÕES ESTUDADAS .....   | 58        |
| 3.2.3.1 Composições Poliméricas .....                                       | 58        |
| 3.2.3.2 Revestimentos Metálicos .....                                       | 59        |
| <b>3.3 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS .....</b>                               | <b>59</b> |
| 3.3.1 COMPÓSITOS – MOLDAGEM INICIAL .....                                   | 60        |
| 3.3.1.1 Moldagem das Placas de Silicone e Poliéster .....                   | 60        |
| 3.3.1.2 Densidade das Composições Poliméricas .....                         | 63        |
| 3.3.1.2.1 <i>Volume de Vazios nos Compósitos Poliméricos</i> .....          | 63        |
| 3.3.2 REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA – INICIAL .....          | 64        |
| 3.3.2.1 Preparo dos Corpos de Prova .....                                   | 64        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.2.2 Processo de Aspersão Térmica .....  | 65        |
| 3.3.3 COMPÓSITOS – <b>MOLDAGEM FINAL</b> .....  | 66        |
| 3.3.4 REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA – <b>FINAL</b> .....   | 68        |
| 3.3.5 CORPOS DE PROVA DE CHUMBO SÓLIDO .....  | 69        |
| <b>3.4 MEDIDAS INICIAIS DE ATENUAÇÃO</b> .....  | 70        |
| 3.4.1 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA .....   | 70        |
| 3.4.2 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO X POR MEIO DE IMAGENS<br>RADIOGRÁFICAS .....   | 71        |
| 3.4.2.1 Arranjo Experimental – LACTEC .....   | 72        |
| <b>3.5 MEDIDAS FINAIS DE ATENUAÇÃO</b> .....  | 73        |
| 3.5.1 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA .....   | 73        |
| 3.5.2 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO X .....  | 73        |
| 3.5.3 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO X - ARRANJO EXPERIMENTAL –<br>Laboratório IEE-USP .....  | 73        |
| <b>3.6 FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DA ATENUAÇÃO – Simulação<br/>Computacional</b> .....  | 76        |
| <b>3.7 OBTENÇÃO DOS EXTRATOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO</b> .....  | 77        |
| <b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>79</b> |
| <b>4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CHUMBO – INICIAL</b> .....  | 80        |
| 4.1.1 ANÁLISE MINERALÓGICA .....  | 80        |
| 4.1.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....  | 81        |
| 4.1.3 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO PÓ POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE<br>VARREDURA .....  | 82        |
| <b>4.2 DENSIDADES DOS MATERIAIS ISOLADOS, DAS COMPOSIÇÕES POLIMÉRICAS E<br/>TEOR DE VAZIOS</b> .....  | 82        |
| <b>4.3 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X</b> .....   | 83        |
| <b>4.4 ANÁLISE QUÍMICA POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)</b> .....  | 87        |
| <b>4.5 CARACTERIZAÇÕES DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS POR MEIO DA TÉCNICA<br/>DE ANÁLISE TÉRMICA</b> .....  | 88        |
| <b>4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E REVESTIMENTOS<br/>METÁLICOS POR MEIO DA TÉCNICA DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE<br/>VARREDURA (MEV)</b> ..... | 95        |
| <b>4.7 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA POR MEIO DA TÉCNICA DE MICROSCOPIA<br/>ÓTICA (OM) PARA OS REVESTIMENTOS METÁLICOS</b> .....                                 | 103       |
| <b>4.8 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS</b> .....   | 111       |
| 4.8.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO .....  | 111       |
| 4.8.2 MEDIDAS DE RUGOSIDADE .....   | 112       |
| 4.8.3 MEDIDAS DA MICRODUREZA <i>VICKERS</i> .....   | 113       |
| <b>4.9 CARACTERIZAÇÃO QUANTO À ATENUAÇÃO DOS COMPÓSITOS</b> .....   | 114       |
| 4.9.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS – <b>ETAPA INICIAL</b> .....   | 115       |
| 4.9.1.1 Escolha do Melhor Compósito a partir da Irradiação com Raios Gama .....   | 115       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.9.1.2 Determinação dos Fatores de Atenuação para os Melhores Compósitos a partir da Irradiação com Raios Gama .....                                 | 118        |
| 4.9.1.3 Escolha do Melhor Compósito a partir da Irradiação com Raios X por meio de Imagens Radiográficas .....  | 121        |
| 4.9.1.4 Determinação dos Fatores de Atenuação para os Melhores Compósitos a partir da Irradiação com Raios X por meio de Imagens Radiográficas .....  | 125        |
| 4.9.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ATENUAÇÃO POR MEIO DA IRRADIAÇÃO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E REVESTIMENTOS METÁLICOS COM RAIOS X – ETAPA FINAL ..... | 128        |
| 4.10 AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E REVESTIMENTOS METÁLICOS, A PARTIR DA IRRADIAÇÃO COM RAIOS X .....                        | 143        |
| 4.11 APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO – SIMULAÇÃO NO PROGRAMA Xcom ....   | 152        |
| 4.12 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS EXPOSTOS AO MEIO AMBIENTE .....  | 154        |
| <b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....</b>  | <b>155</b> |
| 5.1 INTRODUÇÃO .....  | 155        |
| 5.2 DISCUSSÃO GERAL .....   | 155        |
| 5.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA .....  | 156        |
| 5.4 CONCLUSÕES GERAIS .....   | 157        |
| 5.5 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....  | 158        |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 161        |
| APÊNDICE 1 – CONCEITOS APLICADOS À PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....   | 167        |
| APÊNDICE 2 – ANÁLISES E REFERÊNCIAS DOS MATERIAIS APLICADOS NA PESQUISA .....   | 169        |

## LISTA DE FIGURAS

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>FIGURA 2.1</b>  | Diagrama esquemático das grandezas de proteção e operacional, onde $W_R$ e $H_T$ são fatores de peso da radiação e dose equivalente no órgão ou tecido respectivamente (Adaptada de NOGUEIRA, 1997). ....   | 14 |
| <b>FIGURA 2.2</b>  | Espectro total dos raios X (SCAFF, 1997). ....  | 17 |
| <b>FIGURA 2.3</b>  | Variação do espectro dos raios X pela variação da tensão (SCAFF, 1997). ..  | 18 |
| <b>FIGURA 2.4</b>  | Espectro dos raios X em função do material do alvo (SCAFF, 1997). ....  | 18 |
| <b>FIGURA 2.5</b>  | Processo de criação de raios X de <i>Bremsstrahlung</i> (WOLBARST, 1993). ...   | 19 |
| <b>FIGURA 2.6</b>  | Ilustração dos raios X característicos (BARROS, 2001). ....   | 20 |
| <b>FIGURA 2.7</b>  | Espectro do feixe de raios X característicos (Adaptada de WOLBARST, 1993). ....   | 21 |
| <b>FIGURA 2.8</b>  | Curva de transmissão de um feixe de raios X (SCAFF, 1997). ....   | 23 |
| <b>FIGURA 2.9</b>  | Representação esquemática da interação da radiação com o meio (Adaptada de WOLBARST, 1993). ....  | 24 |
| <b>FIGURA 2.10</b> | Páginas de dados de entrada do Programa Xcom (NIST). ....   | 30 |
| <b>FIGURA 2.11</b> | Curvas de atenuação e tabela com dados de saída do programa Xcom (NIST). ....   | 31 |
| <b>FIGURA 2.12</b> | Componentes de uma bateria ácida de chumbo (ABINEE, 2008). ....   | 36 |
| <b>FIGURA 2.13</b> | Classificação dos materiais compósitos, segundo DANIEL e ISHAI (1994). ..   | 39 |
| <b>FIGURA 2.14</b> | Estrutura química do silicone (SBRT, 2008). ....  | 41 |
| <b>FIGURA 2.15</b> | Estrutura química do poliéster insaturado (SILAEX, 2008). ....  | 43 |
| <b>FIGURA 2.16</b> | Sequência esquemática de deposição de um revestimento na aspersão térmica (Adaptada de ZIMMERMANN, 1997). ....  | 44 |
| <b>FIGURA 2.17</b> | Classificação dos principais processos de aspersão térmica com relação ao meio de aquecimento, associado ao tipo de material de adição empregado. (SCHIEFLER, 2004). ....   | 45 |
| <b>FIGURA 2.18</b> | Principais fontes de oxidação das partículas aspergidas em processos que utilizam a combustão de gases como meio de aquecimento (adaptado de KREYE, 1997 e RODRIGUEZ, 2003). ....   | 47 |
| <b>FIGURA 2.19</b> | Esquema da pistola de aspersão à chama (FS) com arame ou pó (MAYER, 1982). ....   | 48 |
| <b>FIGURA 2.20</b> | Modelo de pistola 6P-II (Thermospray® Guns da Sulzer Metco). ....   | 49 |
| <b>FIGURA 2.21</b> | Componentes de uma pistola Thermospray® Guns da Sulzer Metco. ....  | 50 |
| <b>FIGURA 3.1</b>  | Equipamento para o ensaio de dobramento. ....   | 56 |
| <b>FIGURA 3.2</b>  | Rugosímetro utilizado para as leituras de rugosidade. ....  | 57 |
| <b>FIGURA 3.3</b>  | Compósitos poliméricos (mistura de silicone branco + resíduo de chumbo (pó)). (a) SI sem resíduo de chumbo – referência. (b) SI – RC5. (c) SI – RC10. (d) SI – RC20. (e) SI – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa. .... | 61 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>FIGURA 3.4</b>  | Compósitos poliméricos (mistura de poliéster + resíduo de chumbo (pó)). (a) UP sem resíduo de chumbo – referência. (b) UP – RC5. (c) UP – RC10. (d) UP – RC20. (e) UP – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa. .... | 62 |
| <b>FIGURA 3.5</b>  | Corpos de prova jateados. ....  | 64 |
| <b>FIGURA 3.6</b>  | Cabine de jateamento e equipamento de jato de pressão – Laboratório de Aspersão Térmica – UFPR. ....  | 65 |
| <b>FIGURA 3.7</b>  | Deposição do resíduo de chumbo na forma de pó em substrato metálico – Laboratório de Aspersão Térmica – UFPR. ....  | 66 |
| <b>FIGURA 3.8</b>  | Placas poliméricas. (a) SI sem resíduo de chumbo – referência. (b) SI – RC20. (c) SI – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa. ....  | 67 |
| <b>FIGURA 3.9</b>  | Placas poliméricas. (a) UP sem resíduo de chumbo – referência. (b) UP – RC20. (c) UP – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa. ....  | 68 |
| <b>FIGURA 3.10</b> | Revestimento metálico – faces aspergidas. (a) Placa de aço carbono revestida com resíduo de chumbo na forma de pó – 130 x 130 mm (placa utilizada para irradiação). (b) Placa de aço carbono revestida com resíduo de chumbo usada para o ensaio de dobramento. ....                  | 69 |
| <b>FIGURA 3.11</b> | Placas de chumbo sólido utilizadas para os ensaios de atenuação para radiação gama e raios X (imagens radiográficas). ....  | 70 |
| <b>FIGURA 3.12</b> | Arranjo experimental montado no setor de radioterapia – Hospital Erasto Gaetner para o levantamento dos dados de atenuação, resultantes das medições para as diversas composições de várias espessuras. ....  | 70 |
| <b>FIGURA 3.13</b> | Arranjo experimental montado no Laboratório do LACTEC para o levantamento dos dados de atenuação. ....  | 72 |
| <b>FIGURA 3.14</b> | Arranjo experimental IEE-USP. ....  | 74 |
| <b>FIGURA 3.15</b> | Arranjo experimental utilizado para as medições dos fatores de atenuação dos compósitos e revestimentos metálicos. (a = 4000 mm e w = 500 mm). .  | 75 |
| <b>FIGURA 3.16</b> | Fluxograma da utilização do Programa Xcom para os compósitos selecionados e os materiais de referência. ....  | 77 |
| <b>FIGURA 4.1</b>  | Difratograma do resíduo de chumbo. ....   | 80 |
| <b>FIGURA 4.2</b>  | Composição e curva granulométrica do resíduo de chumbo (pó). ....   | 81 |
| <b>FIGURA 4.3</b>  | Fotomicrografia do resíduo de chumbo em forma de pó. (a) Aumento de 500X. (b) Aumento de 16.000X. ....  | 82 |
| <b>FIGURA 4.4</b>  | Difratograma do aço carbono aspergido com RC (na forma de pó). ....   | 87 |
| <b>FIGURA 4.5</b>  | Curva de DSC do chumbo sólido (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N <sub>2</sub> ) e fluxo de 20 ml/min). ....   | 88 |
| <b>FIGURA 4.6</b>  | Curva de DSC do resíduo de chumbo (pó) - (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N <sub>2</sub> ) e fluxo de 20 ml/min). ....  | 89 |
| <b>FIGURA 4.7</b>  | Amostra de resíduo de chumbo (RC). (a) Não oxidada. (b) Oxidada, ambas antes do DSC. (c) Amostra após o DSC. ....   | 90 |
| <b>FIGURA 4.8</b>  | Curva de DSC do silicone branco (SI) - (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N <sub>2</sub> ) e fluxo de 20 ml/min). ....  | 90 |
| <b>FIGURA 4.9</b>  | Curva de DSC do poliéster (UP) - (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N <sub>2</sub> ) e fluxo de 20 ml/min). ....  | 91 |

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <b>FIGURA 4.10</b> | Curva de DSC do SI - RC (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N <sub>2</sub> ) e fluxo de 20 ml/min). ....   | 92  |
| <b>FIGURA 4.11</b> | (a) Amostra do SI, SI – RC20 e SI – RC40 antes da aplicação da técnica de DSC. (b) Amostra do SI após a aplicação da técnica de DSC. (c) Amostra do SI – RC20 após a aplicação da técnica de DSC. (d) Amostra do SI – RC40 após a aplicação da técnica de DSC. ....                                 | 93  |
| <b>FIGURA 4.12</b> | Curva de DSC do UP - RC (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N <sub>2</sub> ) e fluxo de 20 ml/min). ....   | 94  |
| <b>FIGURA 4.13</b> | (a) Amostra do UP, UP – RC20 e UP – RC40 antes da aplicação da técnica de DSC. (b) Amostra do UP após a aplicação da técnica de DSC. (c) Amostra do UP – RC20 após a aplicação da técnica de DSC. (d) Amostra do UP – RC40 após a aplicação da técnica de DSC. ....                                 | 95  |
| <b>FIGURA 4.14</b> | Fotomicrografia (260 X) do chumbo sólido. ....  | 96  |
| <b>FIGURA 4.15</b> | Fotomicrografias de amostras com borracha de silicone (SI). (a) SI puro. (b) SI – RC20. (c) SI – RC40. Aumento de (250X), (500X), (1000X) e (2000X). ....   | 97  |
| <b>FIGURA 4.16</b> | Fotomicrografias de amostras com poliéster (UP). (a) UP puro. (b) UP – RC20. (c) UP – RC40. Aumento de (500X), (1000X) e (2000X). ....  | 100 |
| <b>FIGURA 4.17</b> | Fotomicrografia do aço carbono. (a) Aumento de 250X. (b) Aumento de 500X. ....  | 101 |
| <b>FIGURA 4.18</b> | Fotomicrografias das amostras de aço carbono + RC (pó). (a) Amostra 1. (b) Amostra 2. (c) Amostra 3. (d) Amostra 4. (e) Amostra 5. Aumento de (500X) e (1000X). ....  | 103 |
| <b>FIGURA 4.19</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó). (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Resolução de 1000X. ....  | 104 |
| <b>FIGURA 4.20</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó). (a) Seção transversal do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Resolução de 1000X. ....   | 104 |
| <b>FIGURA 4.21</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 1. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. (f) Resolução de 500X. .... | 105 |
| <b>FIGURA 4.22</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 2. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 200X. (b) Resolução de 500X. (c) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. ....  | 106 |
| <b>FIGURA 4.23</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 3. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 200X. (b) Resolução de 500X. (c) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. ....  | 106 |
| <b>FIGURA 4.24</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 4. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. ....                        | 107 |

|                    |  |     |
|--------------------|--|-----|
| <b>FIGURA 4.25</b> | Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 5. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. .... | 108 |
| <b>FIGURA 4.26</b> | Fotomicrografia da vista da superfície do revestimento de resíduo de chumbo depositado por AT a chama. (a) Aumento de 500X. (b) Aumento de 1000X. ....   | 109 |
| <b>FIGURA 4.27</b> | Micrografia ótica da vista da superfície do revestimento depositado por AT à chama a pó - Aumento de 500X. ....  | 110 |
| <b>FIGURA 4.28</b> | Fotomicrografia da vista transversal do revestimento depositado por AT à chama. (a) Aumento de 500X. (b) Aumento de 1000X. ....  | 111 |
| <b>FIGURA 4.29</b> | Resultado do dobramento das amostras aspergidas com resíduo de chumbo (pó). (a) Imagem superior e (b) Imagem lateral das amostras revestidas. ....   | 111 |
| <b>FIGURA 4.30</b> | Perfil de microdureza para os compósitos metálicos – aço carbono + resíduo de chumbo (na forma de pó) obtidos experimentalmente. ....  | 114 |
| <b>FIGURA 4.31</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama. ....   | 115 |
| <b>FIGURA 4.32</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com poliéster e resíduo de chumbo e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama. ....   | 116 |
| <b>FIGURA 4.33</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama (compósito selecionado). ....   | 119 |
| <b>FIGURA 4.34</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama (compósito selecionado). ....   | 119 |
| <b>FIGURA 4.35</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (100 kV – 1 mA). ....   | 122 |
| <b>FIGURA 4.36</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (100 kV – 1 mA). ....   | 122 |
| <b>FIGURA 4.37</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (compósito selecionado – 70 kV – 1 mA). ....  | 125 |
| <b>FIGURA 4.38</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (compósito selecionado – 70 kV – 1 mA). ....  | 126 |
| <b>FIGURA 4.39</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (80 kV – 40 mA - 0,15 mm Cu). ....  | 129 |
| <b>FIGURA 4.40</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (80 kV – 40 mA - 0,15 mm Cu). ....  | 129 |
| <b>FIGURA 4.41</b> | Curvas de atenuação para os corpos de prova metálicos feitos com aço carbono e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (80 kV – 40 mA - 0,15 mm Cu). ....  | 130 |



|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <b>FIGURA 4.42</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu). ....       | 133 |
| <b>FIGURA 4.43</b> | Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu). ....       | 133 |
| <b>FIGURA 4.44</b> | Curvas de atenuação para os materiais metálicos feitos com aço carbono e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu). .... | 134 |
| <b>FIGURA 4.45</b> | Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos SI – RC20, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA). ....   | 145 |
| <b>FIGURA 4.46</b> | Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos SI – RC40, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA). ....   | 146 |
| <b>FIGURA 4.47</b> | Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos UP – RC20, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA). ....   | 148 |
| <b>FIGURA 4.48</b> | Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos UP – RC40, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA). ....   | 150 |
| <b>FIGURA 4.49</b> | Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para as placas de aço carbono revestidas com RC, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA). ....                                      | 151 |
| <b>FIGURA 4.50</b> | Curvas de Atenuação em Massa x Energia – Materiais de referência e compósitos poliméricos. ....   | 153 |
| <b>FIGURA 4.51</b> | Curvas de Atenuação em Massa x Energia – Materiais de referência e revestimentos metálicos. ....  | 153 |

## LISTA DE FIGURAS – APÊNDICE

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| <b>FIGURA 1.1</b> | Geometria utilizada nas equações derivadas para o cálculo das espessuras das barreiras de proteção, utilizada pelo NCRP 147. Considera-se a barreira primária de proteção de espessura $S_p$ , a uma distância $d_s$ perpendicular ao eixo central do feixe primário, e a barreira secundária de proteção de espessura $S_s$ , a uma distância $d_p$ do ponto focal do tubo de raios X na direção do eixo do feixe primário. Considera-se, ainda, um objeto espalhador, paciente, posicionado a uma distância $d_e$ do ponto focal do tubo de raios X na direção do feixe primário (Adaptada da NCRP 147, 2004). .... | 168 |
|-------------------|---|-----|

## LISTA DE TABELAS

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <b>TABELA 2.1</b>  | Composição média de uma bateria de chumbo ácido para automóveis (JOLLY e RHIN, 1994). ....  | 37  |
| <b>TABELA 2.2</b>  | Parâmetros e propriedades dos processos de aspersão térmica (CLARE <i>et al.</i> , 1982; BRITTON, 1988; BORBECK, 1990; GRASME, 1990; KREYE, 1990; THORPE, 1993; HOEHNE, 1985; PARKER <i>et al.</i> , 1991 e AMIN, 1992). .... | 46  |
| <b>TABELA 3.1</b>  | Critério de avaliação das amostras após o ensaio de dobramento. ....  | 56  |
| <b>TABELA 3.2</b>  | Formulação das misturas desenvolvidas. ....   | 59  |
| <b>TABELA 3.3</b>  | Parâmetros para Aspersão Térmica (inicial). ....  | 65  |
| <b>TABELA 3.4</b>  | Parâmetros para Aspersão Térmica (final). ....  | 69  |
| <b>TABELA 3.5</b>  | Instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio. ....  | 76  |
| <b>TABELA 4.1</b>  | Densidade experimental dos materiais. ....  | 83  |
| <b>TABELA 4.2</b>  | Densidade teórica e experimental dos compósitos. ....   | 83  |
| <b>TABELA 4.3</b>  | Composição química semiquantitativa do chumbo sólido e resíduo de chumbo (RC). ....   | 84  |
| <b>TABELA 4.4</b>  | Composição química semiquantitativa da borracha de silicone (SI), SI – RC20 e SI – RC40. ....   | 84  |
| <b>TABELA 4.5</b>  | Composição química semiquantitativa do poliéster (UP), UP – RC20 e UP – RC40 (feita com perda ao fogo). ....  | 85  |
| <b>TABELA 4.6</b>  | Composição química semiquantitativa do aço carbono e amostras de revestimentos com resíduo de chumbo (pó). ....   | 85  |
| <b>TABELA 4.7</b>  | Composição química das amostras de revestimentos com resíduo de chumbo (pó). ....   | 88  |
| <b>TABELA 4.8</b>  | Espessura dos revestimentos aspergidos. ....  | 108 |
| <b>TABELA 4.9</b>  | Rugosidade do substrato jateado antes de ser revestido com resíduo de chumbo. ....  | 112 |
| <b>TABELA 4.10</b> | Rugosidade do substrato jateado após de ser revestido com resíduo de chumbo. ....   | 113 |
| <b>TABELA 4.11</b> | Microdureza <i>Vickers</i> (HV) em função da distância da superfície do revestimento. ....  | 113 |
| <b>TABELA 4.12</b> | Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação gama, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm). ....  | 116 |
| <b>TABELA 4.13</b> | Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação gama, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados. ....                                      | 120 |
| <b>TABELA 4.14</b> | Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X por meio de imagens radiográficas, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) - (100kV – 1mA). ....                 | 123 |

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <b>TABELA 4.15</b> | Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X por meio de imagens radiográficas, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados - (70kV – 1mA). ..... | 126 |
| <b>TABELA 4.16</b> | Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados - (80kV – 40mA - 0,15mmCu). .....                       | 130 |
| <b>TABELA 4.17</b> | Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados - (150kV – 24mA - 0,7mmCu). .....                       | 134 |
| <b>TABELA 4.18</b> | Fatores de atenuação ( $I/I_0$ ) e espessura equivalente ( $X_{eq}$ ) em chumbo para radiação X em 80 e 150 kV dos compósitos e revestimentos produzidos. ....  | 137 |
| <b>TABELA 4.19</b> | Parâmetros químicos quanto à solubilização e lixiviação de materiais. ....  | 154 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |   |
|--------|---|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                        |
| ACGIH  | American Conference of Governmental Industrial Hygienists       |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária                        |
| ART    | Anotação de Responsabilidade Técnica                            |
| AS     | Arc Spraying  |
| ASTM   | American Society for Testing and Materials                      |
| AT     | Aspersão térmica  |
| CDC    | Center for Disease Control                                      |
| CDR    | Camada Decirredutora  |
| CEMPRE | Compromisso Empresarial para Reciclagem                         |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente                              |
| CNEN   | Conselho Nacional de Energia Nuclear                            |
| CREA   | Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia        |
| CS     | Cold Spraying   |
| CSR    | Camada Semirredutora  |
| DFS    | Distância da fonte à superfície                                 |
| D_gun  | Detonation-Gun  |
| DNPN   | Departamento Nacional de Produção Mineral                       |
| DRX    | Difratometria de Raios X  |
| DSC    | Calorimetria Exploratória Diferencial                           |
| DTA    | Análise Térmica Diferencial                                     |
| EAS    | Estabelecimento Assistencial de Saúde                           |
| EDS    | Energy Dispersive Spectroscopy                                  |
| EIA    | Estudo de Impacto Ambiental                                     |
| EPA    | Environmental Protection Agency                                 |
| EUA    | Estados Unidos da América                                       |
| FAO    | Organização de Alimento e Agricultura                           |
| FRX    | Fluorescência de Raios X  |
| FS     | Flame Spraying  |
| HVOF   | High Velocity Oxy-Fuel  |
| HVCW   | High Velocity Combustion Wire                                   |
| IAEA   | International Atomic Energy Agency                              |
| ICDD   | International Center for Diffraction Data                       |
| ICRP   | International Commission on Radiological Protection             |
| ICRU   | International Commission on Radiological Units and Measurements |

|      |   |
|------|---|
| IEC  | International Eletrotechnical Commission                  |
| IEE  | Instituto de Energia Elétrica                             |
| ISO  | International Organization for Standardization            |
| LDAI | Lead Development Association International                |
| LS   | Laser Spraying  |
| MEV  | Microscópio Eletrônico de Varredura                       |
| MS   | Ministério da Saúde                                       |
| NBR  | Norma Brasileira Registrada                               |
| NBS  | Normas Básicas de Segurança                               |
| NCRP | National Council on Radiation Protection and Measurements |
| NEA  | Nuclear Energy Agency                                     |
| NIST | National Institute of Standards and Technology            |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development    |
| OIEA | International Organization Atomic Energy                  |
| OIT  | Organização Internacional do Trabalho                     |
| OM   | Microscópio Ótico   |
| OMS  | Organização Mundial de Saúde                              |
| OPAS | Organização Panamericana de Saúde                         |
| PS   | Plasma Spraying   |
| PTA  | Plasma Transferred Arc                                    |
| RC   | Resíduo de chumbo   |
| RIMA | Relatório de Impacto do Meio Ambiente                     |
| SBRT | Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas                  |
| SI   | Silicone  |
| SS   | Secretaria da Saúde                                       |
| UP   | Poliéster   |
| WHO  | World Health Organization                                 |

## RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo principal investigar a utilização do resíduo de chumbo em forma de pó, obtido por meio da reciclagem de baterias automotivas, em compósitos poliméricos pela mistura do polímero com o resíduo e em revestimentos depositado por aspersão térmica, quanto às suas propriedades de atenuação, quando aplicados em instalações radiológicas. A metodologia consistiu em confeccionar compósitos poliméricos na forma de placas flexíveis, feitas com silicone branco e resíduo de chumbo e rígidas com poliéster e resíduo de chumbo. No caso dos materiais metálicos, as placas foram obtidas por meio da deposição do resíduo de chumbo na forma de pó no substrato de aço carbono, pelo processo de aspersão térmica à chama. Desenvolvidas as amostras, estas foram submetidas à caracterização mineralógica, química, física e mecânica. Após a escolha dos melhores compósitos, por meio das respostas obtidas na análise das propriedades de atenuação, os mesmos foram avaliados quanto às suas propriedades de atenuação gama e raios X, experimentalmente e por simulação computacional. Como se trata de um resíduo classificado como perigoso, foram feitos testes de avaliação do impacto ambiental dos compósitos poliméricos expostos ao meio ambiente. Depois de comprovada a eficácia dos compósitos quanto às suas propriedades mecânicas, eles poderão ser usados como elementos de atenuação nas barreiras de proteção e blindagens contra radiações ionizantes (raios X e  $\gamma$ ) em ambientes hospitalares, odontológicos e industriais.

Palavras chaves: atenuação, raios X, resíduo de chumbo, polímeros e aspersão térmica.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to investigate the use of lead waste in powder form obtained through the recycling of automotive batteries in polymer composites by mixing the polymer with the waste and coating metal deposited by thermal spraying related to their properties of attenuation when used in radiological facilities. The methodology consisted of producing polymer composites in the shape of flexible plates made of white silicone and lead waste, and rigid plates, polyester and lead waste. In the case of metal materials, the plates were obtained through the deposition of lead powder residue on a carbon steel substrate using thermal spraying process by flame. The produced samples were submitted to mineralogical, chemical, physical and mechanical characterization. The best composite was chosen based on their attenuation response they were evaluated experimentally for their attenuation properties of gamma and X-ray and by computer simulation. Since this is a waste classified as dangerous, tests were carried out to assess the environmental impact of these polymer composites when exposed to the environment. If proven effective the composites can be used as attenuation elements on barriers and shields for protection against ionizing radiation (X and  $\gamma$  rays) in hospital, dental and industrial sectors.

Key words: attenuation, X-ray, lead waste, polymers and thermal spraying.





## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A radiologia diagnóstica e terapêutica está em evolução contínua, em resposta ao desenvolvimento tecnológico, permitindo diagnósticos com maior qualidade e reduzindo a dose tanto em trabalhadores, pacientes e público em geral (NCRP 107, 1990). Convencionalmente, tanto os ambientes como os equipamentos de proteção individuais utilizados em contato com radiações ionizantes são compostos e protegidos por chumbo ou por argamassa baritada, ambos de elevado custo. O objetivo do uso de tais barreiras é poupar os indivíduos expostos, quer sejam trabalhadores, pacientes ou o público em geral. Dessa forma, a ocorrência de acidentes ou doenças causadas pela exposição permanente a raios X ou  $\gamma$  diminuirá.

Considerando a expansão da utilização das radiações ionizantes nas aplicações médicas, odontológicas e industriais e o risco inerente associado ao seu uso, existe a necessidade de se garantir a qualidade dos serviços de radiodiagnóstico e de radioterapia prestados à população, bem como padronizar os requisitos de proteção radiológica para o funcionamento dos estabelecimentos que operam com radiações ionizantes. Para isso, foi estabelecida uma série de recomendações por organismos nacionais e internacionais.

No planejamento de um setor radiológico, devem ser levadas em consideração as recomendações dadas pela NCRP 147 (2004) e ICRP 60 (1991) e as obrigações impostas pela Portaria nº 453 (1998) e RDC nº 189 (2003), ambas do Ministério da Saúde. Além do projeto com as devidas considerações de ordem funcional e do plano de instalações e obras, é preciso desenvolver, como fator de grande importância, um projeto de proteção radiológica, que será apresentado para a devida aprovação pelos órgãos competentes e, posteriormente, entregue ao usuário das instalações quando do início do serviço.

Para esse propósito, deve-se avaliar a quantidade de radiação gerada pelas fontes de radiação primárias e secundárias, bem como utilizar barreiras protetoras seguindo o princípio de que os níveis de radiação devem ser tão baixos quanto

razoavelmente exequíveis - as *low as reasonably achievable* - ALARA (ARCHER *et al.*, 1983).

Diferentes materiais podem ser estudados como alternativa ao chumbo e a argamassa baritada (BARROS, 2001), disponíveis comercialmente, além de haver ainda a possibilidade de desenvolvimento de novos tipos de materiais, tais como: os polímeros (ARTEL, 2000), os cerâmicos (FRIMAIO, 2006) e os compósitos poliméricos misturados com óxido de chumbo (HUSSAIN *et al.*, 1997 e ABDO *et al.*, 2003).

A LDAI (2008) informa que mais de 50 % do chumbo consumido no mundo é obtido a partir da reciclagem ou da reutilização de materiais. Na Europa Ocidental, o valor estimado é de 60 % e nos E.U.A cerca de 70 %. A reciclagem dos resíduos de chumbo é mais fácil e consome muito menos energia do que para produzi-lo a partir de minério de chumbo primário (a produção de chumbo reciclado requer 35 – 40 % da energia necessária para a sua produção). O processo de reciclagem reduz a dispersão do chumbo no meio ambiente, conservando os recursos minerais para o futuro. Estima-se que pelo menos 85 % do chumbo consumido poderiam ser reciclados. No Brasil, em 2007, o percentual de reciclagem de baterias automotivas chegou a 99,5 % (CEMPRE, 2009). Neste processo, todo o chumbo contido nas placas positivas e negativas, nas grelhas e conexões e ainda na solução eletrolítica de ácido sulfúrico pode resultar num material reciclado com as mesmas características do mineral primário. Portanto, além de servir de material para a confecção de novas baterias, pode-se justificar o seu uso também em barreiras para Proteção Radiológica (FERRACIN, 2001 e CHACÓN-SANHUEZA *et al.*, 2004).

Uma das maneiras de utilizar o chumbo reciclado na forma de pó é fazer a deposição do metal por aspersão térmica, que é uma tecnologia que produz revestimentos de metalurgia diferente da clássica fundição.

Diminuir o custo dos materiais utilizados ou usar diferentes materiais de menor custo sedimentará o seu uso na proteção dos serviços radiológicos. Assim sendo, proteger os trabalhadores e pacientes de um serviço radiológico será um investimento em segurança e qualidade de tais serviços.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo principal verificar o comportamento da utilização de resíduo de chumbo em forma de pó em compósitos poliméricos por meio da mistura do polímero com o resíduo e como revestimento em superfície metálica, depositado por aspersão térmica, quanto as suas propriedades de atenuação, quando aplicados em instalações radiológicas.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver compósitos poliméricos e revestimentos metálicos, utilizando resíduo de chumbo na forma de pó proveniente da reciclagem de baterias automotivas.
- Estudar o processo à chama de aspersão térmica na confecção dos revestimentos metálicos.
- Avaliar os compósitos e os revestimentos metálicos quanto as suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e de atenuação.
- Comparar os compósitos selecionados com material de referência (chumbo sólido), para verificar qual composição resulta em propriedades atenuadoras mais satisfatórias.
- Simular o desempenho dos compósitos e dos revestimentos metálicos quanto ao seu comportamento de atenuação, a partir da composição química, empregando programas computacionais.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

A contribuição original dessa pesquisa é a utilização do resíduo de chumbo em forma de pó obtido da reciclagem de baterias, rejeitos de clínicas radiológicas (lâminas de chumbo no interior de filmes) e de sucatas de material para proteção individual (aventais, luvas, protetores, etc.). A utilização desse material como alternativo ao chumbo poderá ser uma alternativa para aditivação de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos, além de contribuir com o meio ambiente, uma

vez que estes materiais, classificados como perigosos (ABNT NBR 10004, 2004), podem ser reciclados, aumentando sua vida útil.

Pretende-se viabilizar um procedimento mais econômico, que demande menor tempo e maior praticidade para aplicação em paredes que necessitem de barreira protetora. Tal justificativa é reforçada, tendo em vista a utilização de subprodutos gerados pelas indústrias, reciclando-os e aproveitando como componentes na elaboração de barreiras contra radiações ionizantes.

Uma das maneiras de utilizar o chumbo reciclado na forma de pó é fazer a deposição do metal por aspersão térmica, que é uma tecnologia que produz revestimentos de metalurgia diferente da clássica fundição. Com este propósito, pode-se aplicar o resíduo de chumbo como revestimento em superfícies cuja finalidade seja a de blindagem contra as radiações ionizantes. Esta metodologia também pode ser usada para o restauro de equipamentos de proteção individual, como por exemplo, rachaduras em aventais, como um processo semelhante ao de soldagem de materiais.

Assim sendo, esta tese abrange cinco capítulos e dois apêndices. No capítulo 1 são apresentadas as considerações sobre a importância do tema, os objetivos gerais e específicos e a justificativa da pesquisa proposta. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica correspondente à definição de compósitos, proteção radiológica, obtenção do resíduo de chumbo e detalhamento do processo de aspersão térmica. No capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos, ou seja, caracterização dos materiais ensaiados, elaboração dos protótipos, procedimentos do ensaio e coleta de dados. No capítulo 4, são apresentados os resultados e as discussões, representando as curvas de atenuação e caracterização mecânica e física dos materiais. O capítulo 5 é dedicado às discussões gerais, conclusões e perspectivas de trabalhos futuros. No apêndice 1, são comentados os conceitos e as metodologias de cálculo para proteção radiológica e, no apêndice 2 são anexadas as características dos materiais e laudos técnicos utilizados na pesquisa.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Na busca constante pela melhoria do desempenho de materiais, que pode ser avaliada sob vários aspectos, como redução de peso, maior resistência, maior resistência à exposição térmica e à radiação, maior resistência ao desgaste entre outras, os materiais normalmente usados já alcançaram o limite de suas aplicações.

Neste sentido, cientistas, engenheiros e pesquisadores da área de materiais estão constantemente trabalhando para melhorar os resultados dos materiais tradicionais ou desenvolver materiais completamente novos, no caso materiais compósitos, exemplo de material concebido dentro desta filosofia.

Visando ao desenvolvimento de compósitos poliméricos e revestimentos metálicos, utilizando resíduo de chumbo proveniente da reciclagem de baterias automotivas, por meio do processo de mistura manual e pela tecnologia de aspersão térmica, bem como a avaliação das propriedades físicas, mecânicas e de atenuação, faz-se necessária a introdução teórica dos elementos a serem estudados.

### 2.1 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

#### 2.1.1 LEGISLAÇÃO, NORMAS TÉCNICAS E RECOMENDAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS

O homem está exposto a diversas fontes de radiação ionizante, naturais e artificiais, que contribuem para a produção de uma *dose* (energia absorvida pelo corpo) em seu organismo. A contribuição de todas as fontes de uso médico para a dose *per capita* varia de uma pequena percentagem da radiação em países em desenvolvimento até percentuais significativamente altos em países desenvolvidos (ICRP, 1993). Dentre as fontes artificiais, a maior parte dessas contribuições é decorrente da utilização em radiologia diagnóstica, que é responsável por cerca de 90% das exposições em países desenvolvidos (ICRP, 1993 e FREITAS, 1992). Para absorver as radiações ionizantes oriundas de fontes artificiais, são necessárias barreiras de proteção feita com material absorvedor. É comum o uso de barreira de

chumbo ou concreto, cuja espessura é dimensionada em função do tipo de radiação da qual se quer se proteger.

A radiologia diagnóstica está em evolução contínua, em resposta ao desenvolvimento tecnológico, permitindo diagnósticos com qualidade cada vez melhor e reduzindo a exposição da população (WRIGHT *et al.*, 1998). Entretanto, faz-se necessário o estudo de materiais aplicados em barreiras de proteção para diminuir os efeitos das radiações quando profissionais e público em geral são expostos, além de aperfeiçoar o dimensionamento e aumentar o conhecimento das propriedades de atenuação para outros materiais.

Com a crescente utilização das radiações ionizantes no diagnóstico médico e odontológico, é necessário padronizar os requisitos de proteção radiológica para o funcionamento das instalações que operam com raios X. Para isso, foram estabelecidas novas recomendações por organismos nacionais (Portaria n.º 2043, 1994; Resolução Estadual SS-625, 1994; Portaria n.º 1884, 1994 e Portaria n.º 453, 1998) e internacionais (ICRP, 1993; ICRP 60, 1991; World Health Organization, 1982; Hospital Physicists Association, 1979 e IAEA, 1994, NCRP 49, 1976 e NCRP 147, 2004).

Em 12 de dezembro de 1994, o Ministério da Saúde (MS) publicou a Portaria n.º 2043 que instituiu, em âmbito nacional, o Sistema de Garantia de Qualidade para equipamentos de raios X, além de outros equipamentos eletromédicos, referenciando as especificações técnicas e requisitos de qualidade contidos em normas técnicas brasileiras (ABNT) ou internacionais (ISO ou IEC).

Logo após, a Secretaria de Estado da Saúde do São Paulo publicou a Resolução Estadual SS-625, que dispõe sobre o uso, a posse e o armazenamento de fontes de radiação ionizante, no âmbito do Estado de São Paulo. Esta norma técnica estabelece diretrizes de radioproteção, disciplina e uso da radiação ionizante nos serviços de saúde e regulamenta as ações e os procedimentos que visem minimizar os riscos decorrentes da exposição à radiação na realização de tratamentos e exames médicos e odontológicos.

Em 1997, o Ministério da Saúde (MS) apresentou para consulta pública, por intermédio da Secretaria Nacional de Vigilância Sanitária, o documento intitulado Diretrizes de Proteção Radiológica em Diagnóstico Médico e Odontológico. Em 1998, foi publicada a Portaria n.º 453, com o título citado. Esta Portaria estabelece:

- I. Diretrizes básicas para a proteção da população dos possíveis efeitos indevidos, inerentes à utilização dos raios X para fins de diagnósticos, visando minimizar os riscos e maximizar os benefícios desta prática.
- II. Parâmetros para o controle das exposições médicas, ocupacionais e do público em geral.
- III. Requisitos para o licenciamento.
- IV. Fiscalização dos serviços que realizam procedimentos radiológicos, médicos e odontológicos.

Cabe aos órgãos de Vigilância Sanitária dos Estados e Municípios assegurar o cumprimento desta Norma.

### 2.1.2 NORMAS TÉCNICAS E RECOMENDAÇÕES APLICADAS À PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Os raios X, como também as radiações provenientes de elementos radioativos, pertencem à família das radiações ionizantes, que representam elevado potencial de danos às pessoas.

Por esse motivo, é necessário que sejam seguidas rigorosamente as regulamentações existentes no país, ou, na ausência destas, outras normas reconhecidas, como, por exemplo, as recomendações da NCRP 147 (2004) para proteção contra radiações.

No planejamento de um setor radiológico, devem ser levadas em consideração as recomendações dadas pela NCRP 147 e as obrigações impostas pela Portaria n.º 453 do Ministério da Saúde. Além do projeto com as devidas considerações de ordem funcional e do plano de instalações e obras, deve-se desenvolver, como fator de grande importância, um plano de proteção radiológica, que será apresentado para a devida aprovação nos órgãos competentes.

Para o dimensionamento das barreiras de proteção, devem-se observar os dados técnicos e de trabalho das instalações radiológicas, estudados por SIMPKIN (1996) e COSTA (1999), que são: a *carga de trabalho*, que fornece a extensão do uso de uma instalação radiológica (em mA x minuto, por semana), e tensão nominal do aparelho; o *fator de uso*, que considera a direção do feixe de radiação sobre a camada de proteção a ser calculada; e o *fator de ocupação*, relacionado com o

tempo de permanência de pessoas nas diferentes áreas de proteção (BARROS *et al.*, 2001).

O dimensionamento de barreiras em uma instalação radiológica, para ambientes hospitalares e odontológicos, deve ser centrado na proteção de trabalhadores, pacientes e público em geral (ICRP 60, 1991). A função da proteção radiológica em ambientes médicos é reduzir as doses de radiação aos pacientes envolvidos em diagnósticos a níveis tão baixos quanto possíveis, com os procedimentos médicos aplicados, minimizar as doses de radiações das pessoas ocupacionalmente expostas ao serviço e limitar as doses de radiação ao público em geral. Para este propósito, deve-se avaliar e controlar a quantidade de radiação gerada pelas fontes de radiação primárias e secundárias, bem como utilizar barreiras protetoras, seguindo o princípio de que os níveis de radiação devem ser tão baixos quanto razoavelmente exequíveis - *as low as reasonably achievable* (NCRP 107, 1990).

Para que se possam garantir os requisitos de proteção radiológica, deve-se respeitar:

- A proteção pela distância, que envolve a Lei do Inverso do Quadrado da Distância;
- A redução do tempo de permanência em um local onde exista radiação;
- A proteção pela interposição de uma barreira protetora entre a fonte e o ambiente que se deseja proteger.

O NCRP 147 (2004) trata dos requisitos práticos e da metodologia para o cálculo de barreiras protetoras para salas onde ocorre a emissão de radiação para fins de radiodiagnóstico.

A Portaria n.º453 do Ministério da Saúde (MS), está baseada nas recomendações dos seguintes órgãos:

- i. Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP 26, 1977; ICRP 60, 1991).
- ii. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica e Segurança, estabelecidas em conjunto pela Organização Mundial da Saúde (WHO), Organização Pan-americana da Saúde (OPAS), Organização Internacional do Trabalho (OIT), Organização de Alimento e Agricultura (FAO), Organização de Energia Nuclear (OECD/NEA) e Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).



Os princípios básicos para o sistema de proteção radiológica, segundo a Portaria nº453 são:

*Justificação da prática e das exposições médicas individuais:* nenhuma prática ou fonte utilizada deve ser autorizada, a menos que produza suficiente benefício para o indivíduo exposto ou para a sociedade, que compense o detrimento causado.

*Otimização da proteção radiológica:* estabelece que as instalações e as práticas devem ser planejadas, implantadas e executadas, de modo que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições acidentais sejam tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, levando em conta fatores econômicos e sociais, além das restrições de dose aplicáveis. A otimização deve ser aplicada tanto nos projetos, desenvolvimentos e instalações de equipamentos, como nos procedimentos de trabalho.

*Limitação de doses individuais:* são valores de dose efetiva ou de dose equivalente, estabelecidos para exposição ocupacional e exposição do público, decorrentes de práticas controladas, cujas magnitudes não devem ser excedidas. As exposições ocupacionais normais de cada indivíduo, resultante da combinação de todas as práticas relevantes, devem ser controladas de forma que os valores dos limites estabelecidos na Norma CNEN-NE-3.01 (2005) não sejam excedidos.

Segundo a Portaria n.º 453, do Ministério da Saúde (MS), as exposições de indivíduos são classificadas em três tipos:

- i. *Exposição Ocupacional* é a exposição ocorrida principalmente como um resultado do trabalho.
- ii. *Exposição Médica* é a exposição de pessoas como parte de seu diagnóstico ou terapia.
- iii. *Exposição Pública* compreende todas as outras exposições.

### 2.1.3 GRANDEZAS E UNIDADES DE MEDIDAS DA RADIAÇÃO

#### 2.1.3.1 Grandezas e Unidades de Uso Geral

Na publicação ICRU 33 (1980) a Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação considera dois grupos de grandezas de radiação: as

grandezas de uso geral e as de proteção radiológica. As grandezas de uso geral são subdivididas em quatro grandes grupos: grandezas radiométricas, coeficientes de interação, grandezas dosimétricas e grandezas de radioatividade. As grandezas para uso em proteção radiológica são subdivididas em grandezas de proteção e grandezas operacionais.

#### 2.1.3.1.1 *Grandezas Radiométricas*

As grandezas radiométricas têm como objetivo caracterizar os campos de radiação. Tais grandezas são aplicáveis tanto ao ar como a um material (ICRU 51, 1993).

- *Fluência*

A caracterização mais elementar de um campo de radiação é feita em termos do tipo, energia, direção e número de partículas. A fluência de fótons,  $\Phi$ , é definida (ICRU 33, 1980) como o quociente de  $dN$  por  $da$ , onde  $dN$  é o número de partículas incidentes sobre uma esfera de seção de área  $da$ ,

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad [\text{m}^{-2}] \quad (2.1)$$

O número de partículas  $N$  pode corresponder às partículas emitidas, transferidas ou recebidas. A fluência de fótons deve variar ponto a ponto em um campo de radiação. Para se obter uma fluência em um ponto específico, considera-se uma pequena esfera infinitesimal. Ela é uma das grandezas radiométricas que pode ser utilizada como grandeza primária.

- *Fluência de Energia*

A fluência de energia,  $\Psi$ , de partículas é o quociente de  $dE$  por  $da$ , onde  $dE$  é a soma das energias, excluindo a de repouso, de todas as partículas incidentes sobre uma esfera de seção de área  $da$  (ICRU 33, 1980),

$$\Psi = \frac{dE}{da} \quad [\text{J.m}^{-2}] \quad (2.2)$$

### 2.1.3.1.2 Grandezas Dosimétricas

Os efeitos da radiação na matéria dependem da extensão do campo de radiação e do grau de interação entre a radiação e a matéria.

As grandezas dosimétricas têm como objetivo fornecer uma medida física em um ponto ou região de interesse, que seja correlacionada com o efeito biológico real da radiação ionizante. A grandeza dosimétrica primária escolhida para representar a deposição de energia em um meio é o kerma.

O termo kerma (*Kinetic Energy Released per Unit of Mass*) é uma grandeza que se refere a transferência inicial da energia para a matéria. Para feixes de fótons na faixa de energia utilizada em radiodiagnóstico é considerada como uma aproximação o kerma.

*Kerma*,  $K$ , pode ser determinado pelo quociente de  $dE_{tr}$  por  $dm$ . O termo  $dE_{tr}$  é o somatório das energias cinéticas iniciais de todas as partículas ionizantes carregadas liberadas por partículas não carregadas (fótons) dentro de um material de massa  $dm$ ,

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \text{ ou } [\text{Gy}] \quad (2.3)$$

A quantidade  $dE_{tr}$  inclui, também, as energias cinéticas dos elétrons Auger. A grandeza física kerma tem a vantagem de ser independente da complexidade do transporte de energia pelas cargas secundárias. Ela pode ser calculada também a partir da fluência de energia seguindo a equação abaixo:

$$K = \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) E \Phi = \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \Psi \quad (2.4)$$

sendo  $\mu_{tr}/\rho$  o coeficiente de transferência de energia específico.

- *Energia Média Transferida*

A energia média transferida,  $\bar{\varepsilon}$ , pela radiação ionizante para a matéria em um volume é dada pela relação:

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q \quad [\text{J}] \quad (2.5)$$

onde

$R_{in}$  = energia da radiação incidente no volume do meio, isto é, o somatório de todas as energias (excluída a energia de repouso) de todas as partículas ionizantes carregadas ou não, que entram no volume

$R_{out}$  = energia da radiação emergente do volume do meio, ou seja, o somatório das energias (excluída a energia de repouso) de todas as partículas ionizantes carregadas ou não, que saem do volume

$\sum Q$  = somatório de todas as alterações (decréscimo: sinal negativo, acréscimo: sinal positivo) da energia de repouso do núcleo e das partículas elementares em qualquer transformação nuclear que ocorra no volume.

- *Dose Absorvida*

A dose absorvida,  $D$ , é o quociente de  $d\bar{\varepsilon}$  por  $dm$ , onde  $d\bar{\varepsilon}$  é a energia transferida média pela radiação ionizante para a massa  $dm$  de matéria, conforme mostra a relação:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \text{ ou } [\text{Gy}] \quad (2.6)$$

A definição de dose absorvida,  $D$ , como uma função pontual, permite a especificação das variações espaciais de  $D$ , da mesma forma que a distribuição de dose absorvida na transferência linear de energia num ponto de interesse.

Esta grandeza é definida com a intenção de providenciar uma medida física que seja correlacionada com o efeito biológico da radiação ionizante.

Na condição de equilíbrio de partículas carregadas e ausência de perdas por *Bremsstrahlung*,  $\mu_{tr}/\rho$  é igual a  $\mu_{en}/\rho$ . Assim, a dose absorvida,  $D$ , no volume  $V$ , é igual ao Kerma. Para fótons monoenergéticos, ambas as grandezas estão relacionadas com a fluência,  $\Psi$ , pela equação:

$$D = K = \Psi \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) = \Psi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \quad (2.7)$$

- *Exposição*

Exposição é a medida da capacidade ou habilidade da radiação X ou gama em produzir ionização no ar. Exposição,  $X$ , é o quociente de  $dQ$  por  $dm$ , onde  $dQ$  é o valor absoluto da carga total de íons de um mesmo sinal produzidos no ar quando todos os elétrons liberados pelos fótons numa determinada massa de ar  $dm$  são completamente freados no ar conforme demonstra a relação:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad [\text{C.kg}^{-1}] \quad (2.8)$$

A ionização produzida pelos elétrons Auger está incluída em  $dQ$ . Porém, a ionização referente aos fótons emitidos por processos radioativos, referentes aos processos de *bremsstrahlung* e fluorescência, não estão incluídos no valor de  $dQ$ .

Apesar das recomendações para o uso de unidades do Sistema Internacional, ainda é muito utilizada a unidade Roentgen, R, para as medidas de exposição. A relação (2.9) mostra a equivalência entre elas.

$$1[R] = 2,58 \times 10^{-4} [\text{C.kg}^{-1}] \quad (2.9)$$

### 2.1.3.2 Grandezas e Unidades Usadas em Proteção Radiológica

Dois tipos de grandezas são especificamente definidos para uso em proteção radiológica: as *grandezas de proteção*, as quais são definidas pela ICRP e as *grandezas operacionais*, as quais são definidas pela ICRU.

As três principais grandezas de proteção recomendadas pela ICRP e ICRU para uso em proteção radiológica são:

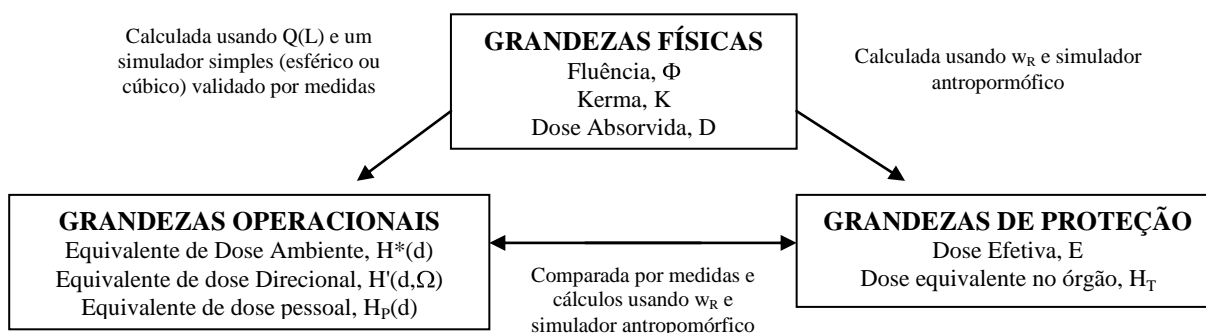
- Dose absorvida média em um órgão ou tecido,  $D_T$ .
- Dose equivalente em um órgão ou tecido,  $H_T$ .
- Dose efetiva,  $E$ .

As *grandezas de proteção* não são diretamente mensuráveis, mas podem, por meio de cálculos, serem relacionadas com o campo de radiação no qual ocorre a exposição. Para estabelecer uma ligação entre as grandezas de proteção e o campo de radiação, a ICRU desenvolveu *grandezas operacionais* para medida da

exposição à radiação externa (ICRU 47, 1992). A Figura 2.1 apresenta um esquema das grandezas de proteção e operacionais.

As grandezas operacionais, definidas pela ICRU 51 (1993) para medidas físicas, são:

- i. Equivalente de dose ambiente,  $H^*(d)$ .
- ii. Equivalente de dose direcional,  $H'(d, \Omega)$ .
- iii. Equivalente de dose pessoal,  $H_p(d)$ .



**FIGURA 2.1** – Diagrama esquemático das grandezas de proteção e operacional, onde  $W_R$  e  $H_T$  são fatores de peso da radiação e dose equivalente no órgão ou tecido respectivamente (Adaptada de NOGUEIRA, 1997).

#### 2.1.3.2.1 Grandezas de Proteção

Para os propósitos de Proteção Radiológica, foi introduzido um fator de qualidade de radiação,  $Q$ , para quantificar a dose absorvida para a eficiência biológica de partículas carregadas que geram tal dose. Foi formulada para levar em conta a eficiência relativa dos diferentes tipos de radiação ionizante nos baixos níveis de exposição encontrados na prática de proteção radiológica. Essa grandeza ponderada recebeu o nome de equivalente de dose,  $H$ , definido (ICRU 40, 1986).

O equivalente de dose,  $H$ , é o produto entre  $Q$  e  $D$  em um ponto do tecido, onde  $D$  é a dose absorvida e  $Q$  é o fator de qualidade naquele ponto, conforme a relação:

$$H = Q \times D \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \text{ ou } [\text{Sv}] \quad (2.10)$$

A grandeza equivalente de dose é definida para aplicações de rotina de proteção radiológica. Não deve ser utilizado na avaliação de exposições de altos níveis de radiação, como exemplo no caso de acidentes.

- *Equivalente de dose efetivo*

Na ICRP 26 (1977) foi introduzindo o equivalente de dose efetivo,  $H_E$ , como uma grandeza de proteção a ser usada em dosimetria interna e mais tarde aplicado a dosimetria de irradiação externa do corpo. O equivalente de dose efetivo é definido por

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad [\text{J.kg}^{-1}] \text{ ou } [\text{Sv}] \quad (2.11)$$

e  $H_T$  é a dose equivalente no tecido ou órgão  $T$  e  $w_T$  é o fator de ponderação para o tecido ou órgão.

Na ICRP 60 (1991) foi introduzida a dose absorvida média,  $D_{T,R}$ , em um órgão ou tecido,  $T$ , gerada por uma radiação do tipo  $R$ , incidente no corpo. A *dose equivalente*,  $H_T$ , de um órgão ou tecido  $T$ , é então definida como a soma ponderada de  $D_{T,R}$ , sobre as várias radiações  $R$ ,

$$H_T = \sum_R w_R H_{T,R} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \text{ ou } [\text{Sv}] \quad (2.12)$$

A *dose efetiva*,  $E$ , é a soma das doses equivalentes,  $H_T$ , em tecido ou órgão, ponderado pelos fatores de peso do tecido,  $w_T$ .

$$E = \sum w_T H_T \quad [\text{J.kg}^{-1}] \text{ ou } [\text{Sv}] \quad (2.13)$$

#### 2.1.3.2.2 Grandezas Operacionais para Monitoração de Área

Em Proteção Radiológica existem dois tipos distintos de medidas operacionais para as radiações fortemente penetrantes:

- Medidas preventivas* ou antecipatórias, através da monitoração de área ou ambiental. Elas são realizadas no ambiente com radiação, na ausência de

indivíduos e são usadas para demonstrar que um local de trabalho é seguro. A grandeza usada nestas medidas é o *equivalente de dose ambiente*,  $H^*(d)$ .

O *equivalente de dose ambiente*,  $H^*(d)$  em um ponto do campo de radiação, é o equivalente de dose que poderia ser produzido pelo campo expandido correspondente alinhado, na esfera da *International Commission on Radiation Units and Measurements*, ICRU, a uma profundidade,  $d$ , no seu raio, na direção oposta ao campo alinhado.

A unidade utilizada para o equivalente de dose ambiente é  $[J.kg^{-1}]$  ou o Sievert [Sv].

Qualquer referência em unidades de equivalente de dose ambiente deve incluir a especificação de referência de profundidade,  $d$ . Para simplificar a notação,  $d$  deve ser expresso em [mm].

Medidas de  $H^*(d)$  geralmente requerem que o campo de radiação seja uniforme em toda dimensão do instrumento e que o instrumento possua uma resposta isotrópica.

Para radiações fortemente penetrantes, uma profundidade de 10mm é atualmente recomendada, sendo referida por  $H^*(10)$ .

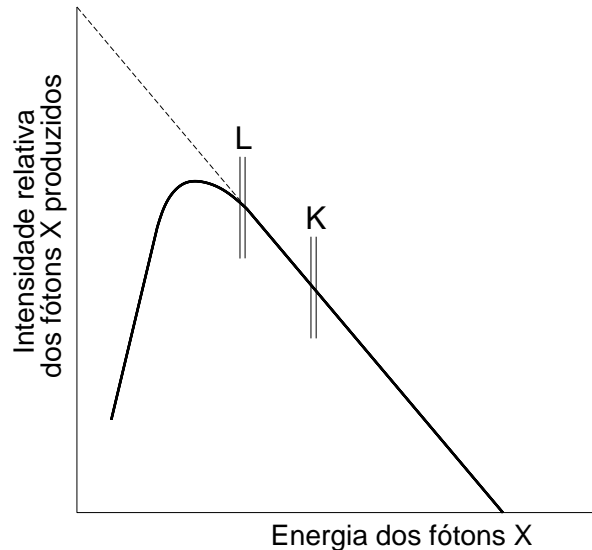
- ii. *Medidas confirmatórias*, através da monitoração individual. Elas são realizadas diretamente no corpo do indivíduo exposto, cuja função principal é fornecer informações para o controle das exposições e a estimativa da dose recebida por um indivíduo. A grandeza usada nestas medidas é o *equivalente de dose individual penetrante*,  $H_P(d)$ .

#### 2.1.4 RAIOS X

O espectro de um feixe de raios X é determinado principalmente pela tensão (kV) do tubo, material alvo e quantidade e os tipos de filtração do feixe. Os fótons de raios X produzidos de maior energia (poucos) têm a mesma energia dos elétrons que bombardeiam o anodo. Fótons de baixa energia são absorvidos por efeito fotoelétrico no próprio anodo ou nas paredes do tubo de vidro da ampola e, portanto, o espectro dos raios X é modificado, como mostra a Figura 2.2. Se for adicionado um filtro de alumínio na saída do feixe, constituindo a filtração adicional



(BUSHBERG *et al.*, 1994; DE VOS, 1995), há uma redução do número de fótons de baixa energia, estes inúteis para radiodiagnósticos.



**FIGURA 2.2** – Espectro total dos raios X (SCAFF, 1997).

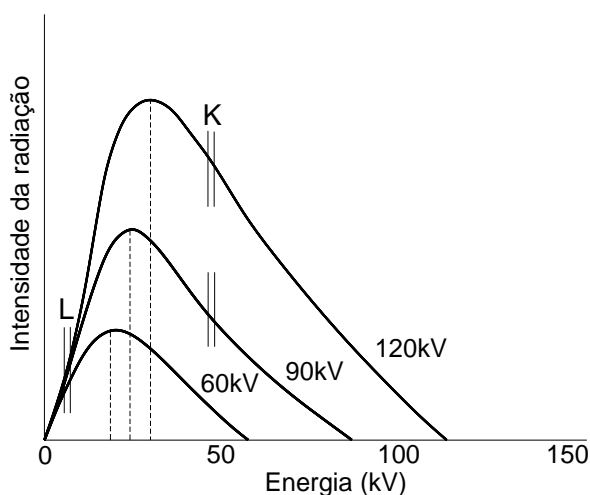
A linha tracejada corresponde ao espectro contínuo que emerge do alvo e a linha cheia, o espectro após os fótons de baixa energia ser absorvidos pelo vidro (filtração inerente). Com a superposição dos espectros, obtêm o espectro de linhas (SCAFF, 1997).

Os raios X característicos são produzidos quando a energia cinética dos elétrons excede a energia de ligação dos elétrons de orbitais internos dos átomos do material alvo. A energia cinética dos elétrons é determinada inteiramente pela tensão aplicada no tubo de raios X. Se a tensão é constante com o tempo, o espectro das energias cinéticas finais dos elétrons acelerados através do potencial é um pico único e estreito. A energia cinética de pré impacto dos elétrons em eV, é numericamente igual ao potencial aplicado ao tubo de raios X, em volts.

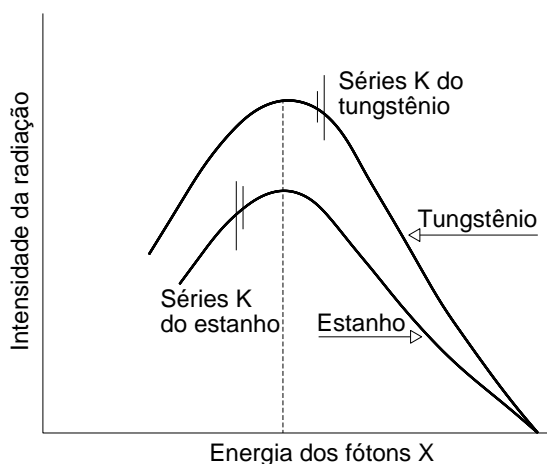
A emissão total dos raios X depende do número de elétrons que colidem no alvo, isto é, da corrente do tubo – quanto maior a corrente do tubo, maior o número de elétrons e, portanto, mais radiação X produzida. Entretanto, a qualidade de radiação (poder de penetração) não será alterada por variações de corrente (mA), concluindo-se que a quantidade de raios X produzidos é proporcional à corrente de elétrons no interior do tubo (corrente anódica).

O feixe de raios X, provenientes do ponto focal do tubo, é divergente, sendo que sua intensidade diminui com o inverso do quadrado da distância. Portanto, a distância entre o tubo de raios X e o ponto de medição não influenciam na qualidade do feixe de raios X, mas somente sua intensidade, exceto, porém, para feixes de energias baixas, que sofrem uma grande atenuação pelo ar, modificando seu espectro de energia.

A habilidade de o feixe penetrar em tecidos e interagir diferentemente com diversos materiais do detetor depende da tensão, da forma de onda da tensão e da quantidade e do tipo de filtração. As Figuras 2.3 e 2.4 mostram os espectros dos raios X, função da variação da tensão e do material alvo, respectivamente.



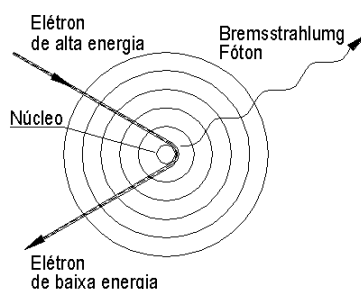
**FIGURA 2.3** – Variação do espectro dos raios X pela variação da tensão (SCAFF, 1997).



**FIGURA 2.4** – Espectro dos raios X em função do material do alvo (SCAFF, 1997).

Existem dois mecanismos diferentes de produção de raios X, resultantes das interações inelásticas (interações que conduzem à perda de energia dos elétrons em um dado meio), que podem fornecer um espectro característico, ou de linhas de raios X, e um espectro contínuo de raios X.

Quando um elétron acelerado passa próximo do núcleo de um átomo constituinte do alvo, o elétron pode ser desviado de sua trajetória pela ação da força de interação eletromagnética com o núcleo e perder uma parte ou toda sua energia, por meio da criação de fótons de *bremsstrahlung*, como mostra a Figura 2.5. Quanto mais energético o elétron incidente e mais abrupta a variação de sua velocidade, maior a energia cinética que é transformada diretamente em energia do fóton de raios X. Considerando um feixe de elétrons, haverá a produção de um espectro contínuo de raios X.

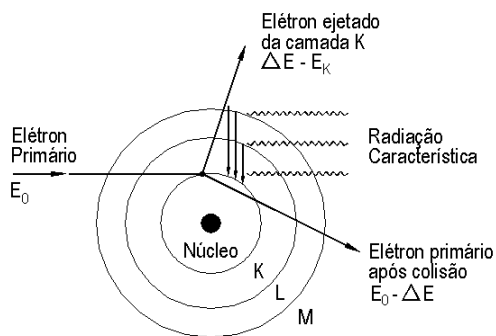


**FIGURA 2.5** – Processo de criação de raios X de *Bremsstrahlung* (WOLBARST, 1993).

Os raios X de *bremsstrahlung* produzidos por um anodo (diferente dos elétrons incidentes nele), não tem todos a mesma energia. O número relativo de fótons é função decrescente de sua energia, chegando à zero nas energias dos elétrons incidentes. Uns poucos elétrons transformam a maior parte ou toda a energia cinética em radiação de *bremsstrahlung*, mas a grande maioria gera fótons de frequência mais baixa e desperdiça a maior parte de sua energia no aquecimento do anodo.

A produção de raios X característicos ocorre quando um elétron, com energia cinética  $E_0$ , interage com um elétron de uma camada interna de um átomo do alvo, transferindo uma energia  $\Delta E$  suficiente para superar a energia de ligação do elétron no orbital e para ejetá-lo do átomo, que se torna ionizado. A energia necessária para remover um elétron da camada K do átomo de tungstênio é de 69,5

keV, que é a energia de ligação do elétron nesta camada. Para a camada L do tungstênio, a energia de ligação varia de 10 a 12 keV. A Figura 2.6 mostra a produção de raios X característicos.



**FIGURA 2.6** – Ilustração dos raios X característicos (BARROS, 2001).

No arranjo, surge radiação X, chamada de característica, porque seus valores são discretos e característicos de cada elemento. Esta radiação forma o espectro característico ou de linhas dos raios X.

Para tensões aplicadas entre 80 e 150 kV, pode-se dizer que a radiação característica contribui com aproximadamente 10% do total dos raios X produzidos pelos dois mecanismos. Para tensões maiores, a contribuição do espectro de linhas torna-se muito pequena e negligenciável (SCAFF, 1997).

A forma geral do espectro de um feixe de diagnóstico é diferente do processo *bremsstrahlung* e amplamente independente da construção do tubo e parâmetros de operação. Mas a energia da maior parte dos fótons energéticos, a energia dos fótons da intensidade de pico e a amplitude relativa das linhas dos raios X característicos são determinados pelo ajuste da tensão. A forma da parte de baixa energia da curva depende da quantidade de filtração intencional e outras formas de endurecimento do feixe. Os espectros de raios X obtidos a 100 kV, com um alvo de tungstênio e quantidades diferentes de filtração, são mostrados na Figura 2.7.

A curva A mostra o espectro de *bremsstrahlung* puro, não endurecido. A curva B inclui os picos de raios X característicos de tungstênio e os efeitos do endurecimento do feixe pelo próprio anodo. A adição de filtração do feixe com alumínio dá origem à curva C.



onde  $I_0$  é a intensidade do feixe incidente e  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear do material absorvedor.

Para cada energia do feixe de radiação e para cada material absorvedor, tem-se um coeficiente de atenuação específico.

A camada semirredutora (CSR) é a espessura necessária para reduzir a intensidade do feixe à metade, representada por  $x_{1/2}$  e vale:

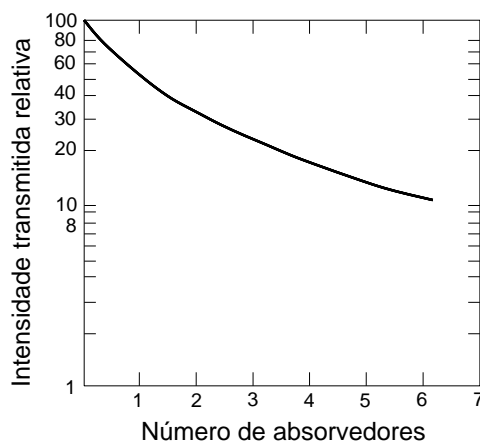
$$x_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \quad (2.15)$$

Esta equação só é válida quando o coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) é constante; quando os fótons do feixe incidente possuem a mesma energia e o feixe é estreito.

O *coeficiente de atenuação de massa* ( $\mu/\rho$ ) é o coeficiente de atenuação linear pela densidade do material. Este coeficiente independe da densidade do absorvedor e possui dimensões  $\text{cm}^2/\text{g}$ . É a redução fracional da intensidade do feixe, produzida por um absorvedor de espessura  $1 \text{ g/cm}^2$ .

#### 2.1.4.2 Atenuação de um Feixe de Raios X

Quando o feixe de raios X é estreito (colimado), o espectro com fótons de energia varia desde zero até um valor máximo dado pela energia dos elétrons incidentes no alvo, sendo que a redução fracional por unidade de absorvedor não é constante (SCAFF, 1997). A curva de atenuação deste feixe não é uma reta em um papel semilog, conforme mostrado na Figura 2.8.



**FIGURA 2.8** – Curva de transmissão de um feixe de raios X (SCAFF, 1997).

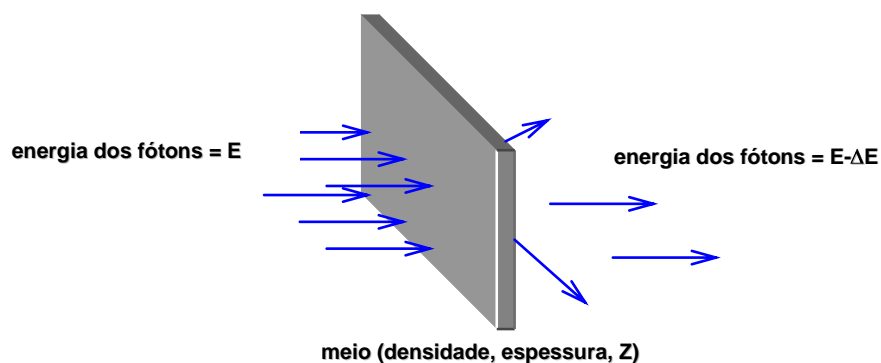
#### 2.1.4.3 Energia Efetiva

Considerando que os feixes de raios X utilizados em radiologia diagnóstica são sempre policromáticos, a taxa de penetração de um material é função de cada fóton com energia diferente. Ao se determinar a taxa de atenuação do feixe, pode-se fazer uma comparação entre os espectros do feixe policromático com um feixe monoenergético, obtendo-se uma energia efetiva que seja equivalente entre eles.

No caso da radiologia diagnóstica, algumas vezes torna-se conveniente expressar a qualidade do feixe de raios X em termos de sua energia efetiva. Portanto, a energia efetiva é definida como sendo a energia de um feixe monoenergético, que possui a mesma camada semirredutora de um feixe heterogêneo (KHAN, 1994; JOHNS *et al.*, 1983; SPRAWLS, 1990 e IAEA, 1994).

#### 2.1.5 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM A MATÉRIA

Um feixe de radiação eletromagnética ionizante é atenuado quando este, ao se propagar por meio da matéria, sofre redução na sua intensidade. Os fatores que afetam as interações com a matéria são a densidade, a espessura, o número atômico do material e a energia do fóton incidente. A Figura 2.9 mostra esquematicamente a passagem de um fóton pelo material.



**FIGURA 2.9** – Representação esquemática da interação da radiação com o meio (Adaptada de WOLBARST, 1993).

A absorção dos raios X pela matéria se dá pelos efeitos de espalhamento e absorção de energia. Em um exame diagnóstico, costuma-se utilizar feixes de raios X com tensão inferior a 150 kV (Portaria nº453, 1998). Nestas condições, a radiação é espalhada devido aos efeitos Compton (incoerente) e Rayleigh (coerente), enquanto que a absorção da radiação ocorre devido ao efeito fotoelétrico.

No processo de absorção da radiação por efeito fotoelétrico, o fóton incide sobre um elétron de uma camada atômica interna e transfere toda sua energia a este elétron. O elétron ejetado, ou fotoelétron, emerge com energia cinética transferida do elétron  $e^- = E - EL$  onde  $E$  é a energia do fóton incidente e  $E.L.$  a energia de ligação do elétron ao átomo. Portanto, para que o efeito fotoelétrico ocorra, é necessário que a energia do fóton seja maior que a energia de ligação do elétron. Como há ionização e o átomo fica excitado, esta excitação é eliminada pelo preenchimento da vaga criada pelo elétron ejetado por um elétron de outra camada, e assim sucessivamente. A diferença entre a energia destas camadas dá origem à radiação característica.

O espalhamento coerente é dado àquelas interações em que a radiação sofre uma mudança na direção sem mudar o comprimento de onda, ou seja, sem variação de energia. Por essa razão, utiliza-se o termo "espalhamento não modificado".

Existem dois tipos de espalhamento coerente: o *espalhamento Thompson*, que corresponde à interação com elétrons livres do meio absorvedor, em que um fóton de baixa energia é absorvido pelo elétron, vibra e, por ser uma partícula carregada, emite radiação no mesmo comprimento de onda e o *espalhamento*



*Rayleigh*, que envolve todos os elétrons do átomo. Neste tipo de espalhamento, a radiação de baixa energia encontra os elétrons de um átomo e coloca-os numa vibração com a mesma frequência do fóton. Os átomos vibram e perdem a energia em forma de radiação, voltando assim a seu estado anterior.

No efeito Compton (incoerente), o fóton interage com um elétron relativamente livre do átomo, e parte da energia da radiação incidente é transferida para o meio irradiado. Neste tipo de interação, uma fração da energia do fóton incidente,  $E$ , é fornecida a um elétron, que recua após a colisão. Quanto maior for a energia dos fótons, menor será a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, e o efeito Compton torna-se o mais importante. Em radiologia, a maior parte da radiação espalhada é proveniente do efeito Compton.

#### 2.1.6 RAIOS GAMA

*Radiação gama* ou *raios gama* ( $\gamma$ ) é um tipo de radiação eletromagnética produzida geralmente por elementos radioativos ou processos subatômicos como a aniquilação de um par pósitron-elétron.

Após a emissão da partícula pelo núcleo, o processo radioativo se completa, mas, em muitos casos, o núcleo filho ainda contém certa quantidade de energia, nucleon de um nível excitado para outro de menor energia e na desintegração de isótopos radioativos.

A energia deste tipo de radiação é medida em Megaelétron-volts (MeV). Um MeV corresponde a fótons gama de comprimentos de onda inferiores a  $10^{-11}$  metros ou frequências superiores a  $10^{19}$  Hz.

#### 2.1.7 FATORES QUE INTERFEREM NA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Com o aumento da cobertura e da complexidade do atendimento em saúde, é necessária uma racionalização no emprego dos recursos financeiros e a procura de novas metodologias para o planejamento de recursos físicos em saúde, e para o dimensionamento de equipamentos de saúde.

No processo de desenvolvimento de recursos físicos em saúde, algumas etapas são consideradas necessárias para o seu desenvolvimento. Estas etapas

são: a organização do processo, o planejamento, o projeto, a colocação em operação e a avaliação do processo (PEIXOTO, 1994).

A influência da arquitetura e da engenharia civil em obras que envolvem as organizações de saúde, em especial obras de proteção do espaço físico exposto à radiação, devem ser tomados alguns cuidados especiais, seguindo as recomendações do físico-médico e do engenheiro e do arquiteto especializado neste tipo de edificação. Cabe ao físico-médico estabelecer normas de segurança para o corpo clínico, pacientes e circulação externa à sala submetida à radiação, por meio do conhecimento da intensidade do feixe, finalidade do uso, tipo de radiação, entre outros fatores. Cabe ao engenheiro civil e/ou arquiteto especializado, a responsabilidade de projetar e construir o espaço físico que cumpra com as necessidades normativas estabelecidas pelo físico-médico, dentro de parâmetros de segurança (Portaria nº 1884, 1994).

#### 2.1.8 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE BARREIRAS PARA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Os efeitos da radiação podem ser divididos em efeitos de manifestação rápida e efeitos de manifestação tardia. Sabe-se que na manifestação em curto prazo, pessoas submetidas à exposição a altos níveis de radiação estão sujeitas a danos nos tecidos expostos do corpo humano. Estes efeitos da radiação podem ser diagnosticados clinicamente no indivíduo exposto. Denominam-se efeitos determinísticos porque, ao receber uma dose de radiação superior a um dado limite, é correto afirmar que haverá um dano à saúde do paciente com maior ou menor gravidade, dependendo da dose. Quanto à manifestação em longo prazo, pode-se dizer que estudos de populações expostas à radiação, especialmente os sobreviventes dos bombardeios atômicos, demonstram que a exposição também pode provocar câncer e danos hereditários.

A exposição da radiação ionizante é medida na forma de dose efetiva. Esta dose é função da energia cedida ao tecido pela radiação, levando-se em conta o tipo de radiação e a sensibilidade dos tecidos irradiados. Pode-se conseguir uma redução na dose efetiva atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos pelas organizações de saúde. Estes requisitos se aplicam à proteção dos trabalhadores e ao público. Em troca, para proteger os pacientes expostos à radiação ionizante por

razões médicas, deve-se aplicar uma dose de tal maneira que a radiação produza um benefício maior que os danos que podem ser causados. Devem-se reduzir ao máximo as doses e riscos, tendo-se em conta os aspectos econômicos e sociais, bem como aplicar restrições para impedir uma distribuição sem controle da exposição.

#### 2.1.9 INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE CÁLCULO

Entre 1922 e 1928 ocorreram as primeiras publicações referentes às recomendações oficiais de proteção radiológica para trabalhadores da área radiológica e a fundação do ICRP (International Commission on Radiation Protection), que passou a definir os limites e as principais diretrizes de proteção radiológica (ARCHER, 1995).

A partir de 1969 é que começou a surgir a publicação de relatórios com recomendações específicas para a proteção de salas radiológicas.

Todo o processo de cálculo era feito utilizando curvas do tipo logarítmicas (curvas de atenuação). Este procedimento não era exato, pois dependia da qualidade de impressão destas curvas, da exatidão na leitura feita pelo observador, da aproximação dos resultados e de outros fatores que interferem no resultado final da proteção.

Para minimizar este problema, foram usados alguns conceitos matemáticos já estudados por profissionais da área de radiologia (ARCHER *et al.*, 1983; ARCHER *et al.*, 1994 e COSTA, 1999).

ARCHER, em 1995, revisou os conceitos de proteção utilizados em Radiologia Diagnóstica.

Nas últimas décadas, o NCRP 49 (1976), substituído pelo NCRP 147 (2004), juntamente com as determinações da Portaria nº 453, tem sido utilizados para o cálculo das barreiras atenuantes para a radiação X, com o objetivo de proteger o ser humano dos efeitos nocivos da radiação ionizante e usufruir dos benefícios desta radiação com segurança (FRIMAIO, 2006).

### 2.1.10 FUNÇÃO CUSTO – OBRA CIVIL

Com o avanço da tecnologia, novos equipamentos estão sendo desenvolvidos com características técnicas mais eficientes no que se refere à diminuição da radiação, existência de filtros, disparadores automáticos, controles e ajustes automáticos e outras.

Para determinar a necessidade de blindagem num local, é preciso conhecer a taxa de exposição. Esta informação pode ser dada pelo fabricante; porém, é recomendável usar dados medidos diretamente com instrumentos devidamente calibrados. Em alguns casos, pode ser levado em consideração o tipo de área fora da parede blindada, fazendo concessões diferentes de acordo com a utilização (corredor, almoxarifado ou área de trabalho). Este procedimento pode economizar a espessura da blindagem.

Para determinar o tipo de blindagem segura, deve-se levar em consideração a radiação primária (feixe de raios ionizantes) e a radiação secundária (radiação de fuga e espalhada). Levantando-se todos estes elementos, tais como: projeto arquitetônico específico para a área em questão, o planejamento do uso e a operação de instalação e de fontes de radiação, normas de segurança, manuais de funcionamento dos equipamentos e aplicando um controle das doses nas exposições por meio de um Programa de Garantia de Qualidade, poder-se-á reduzir os custos das proteções, aplicando adequadamente a metodologia de cálculo (CNEN-NE 3.01, 2005).

## 2.2 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO

As metodologias adotadas para a obtenção dos coeficientes de atenuação seguem as recomendações da NCRP 147 (2004) e da norma ABNT NBR/IEC 61331-1(2004). Estes coeficientes também podem ser calculados e representados na forma de curvas de atenuação, por meio do programa Xcom (2008), desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards Technology*). Os valores dos coeficientes de atenuação para diversos materiais são obtidos levando-se em consideração a energia da radiação e a composição química de um material (elemento) ou mistura de vários materiais (compósitos), conforme mostrado na Figura 2.10. Inicialmente,

identifica-se o tipo de material: elemento, composto ou mistura e energias diferenciadas (opcional). Na sequência de entrada dos dados é adicionada a composição química (fração em peso %) dos compósitos ou misturas, intervalo de energia e o tipo de gráfico que se deseja obter: atenuação total com ou sem espalhamento, absorção fotoelétrica e produção de pares no campo do núcleo e no campo do elétron.

Address: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

**NIST**  
National Institute of Standards and Technology  
Physics Laboratory

## XCOM

### Element/Compound/Mixture Selection

In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:

[Help](#)

**Identify material by:**

- ☒ Element
- ☐ Compound
- ☐ Mixture

**Method of entering additional energies: (optional)**

- ☒ Enter additional energies by hand
- ☐ Additional energies from file (*Note: Your browser must be file-upload compatible*)

Address: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2>

**Enter the formulae and relative weights separated by a space for each compound. One compound per line. For example:**

H2O 0.9  
NaCl 0.1

Note: Weights not summing to 1 will be normalized.

**Optional output title:**

**Graph options:**

- ☒ Total Attenuation with Coherent Scattering
- ☐ Total Attenuation without Coherent Scattering
- ☐ Coherent Scattering
- ☐ Incoherent Scattering
- ☐ Photoelectric Absorption

**Additional energies in MeV: (optional) (up to 75 allowed)**

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used).  
One energy per line. Blank lines will be ignored.

☒ Include the standard grid

Address <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2> Go Links »

Formula for compound (e.g. H<sub>2</sub>O for water):

Optional output title:

**Graph options:**

- ☒ Total Attenuation with Coherent Scattering
- ☐ Total Attenuation without Coherent Scattering
- ☐ Coherent Scattering
- ☐ Incoherent Scattering
- ☐ Photoelectric Absorption
- ☐ Pair Production in Nuclear Field
- ☐ Pair Production in Electron Field
- ☐ None

**Additional energies in MeV: (optional) (up to 75 allowed)**

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used).  
One energy per line. Blank lines will be ignored.

|  |
|--|
|  |
|--|

☒ Include the standard grid

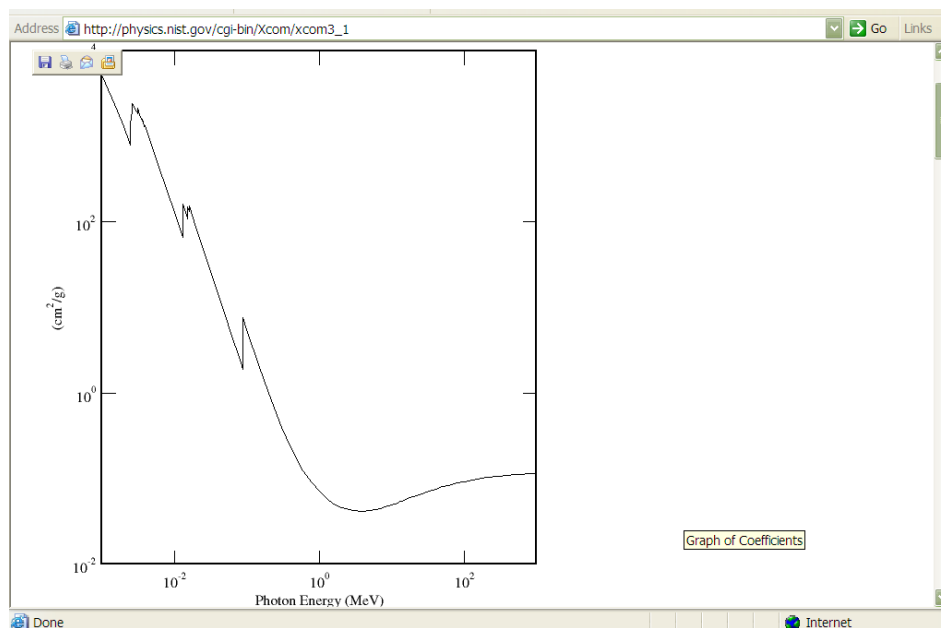
**Energy Range:**

Minimum:  MeV

Maximum:  MeV

**FIGURA 2.10** – Páginas de dados de entrada do Programa Xcom (NIST).

Os resultados são obtidos através da representação gráfica escolhida com a tabela de dados. A Figura 2.11 apresenta os dados de saída.



Address [http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom3\\_1](http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom3_1) Go Links

**Atomic Number : 82**

To download data in spreadsheet (array) form, choose a delimiter and use the checkboxes in the table heading. After downloading, save the output by using your browser's Save As feature.

**Delimiter:**

☒ space  
☐ | (vertical bar)  
☐ tab  
☐ newline

Download data Reset

| Edge              | (required)<br>Photon<br>Energy<br>MeV | Scattering                        |                                     | Photoelectric<br>Absorption<br>cm <sup>2</sup> /g | Pair Production                              |   | Total Attenuation                                    |   |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|--|---|
|                   |                                       | <input type="checkbox"/> Coherent | <input type="checkbox"/> Incoherent |   | <input type="checkbox"/> In Nuclear<br>Field | <input type="checkbox"/> In Electron<br>Field | <input type="checkbox"/> With Coherent<br>Scattering | <input type="checkbox"/> Without Coherent<br>Scattering |
|                   |                                       | cm <sup>2</sup> /g                | cm <sup>2</sup> /g                  |   | cm <sup>2</sup> /g                           | cm <sup>2</sup> /g                            | cm <sup>2</sup> /g                                   | cm <sup>2</sup> /g                                      |
|                   | 1.000E-03                             | 1.25E+01                          | 3.59E-03                            | 5.20E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 5.21E+03   | 5.20E+03  |
|                   | 1.500E-03                             | 1.20E+01                          | 6.60E-03                            | 2.34E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 2.36E+03   | 2.34E+03  |
|                   | 2.000E-03                             | 1.14E+01                          | 9.62E-03                            | 1.27E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 1.29E+03   | 1.27E+03  |
|                   | 2.484E-03                             | 1.09E+01                          | 1.24E-02                            | 7.90E+02  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 8.01E+02   | 7.90E+02  |
| 82 M <sub>5</sub> | 2.484E-03                             | 1.09E+01                          | 1.24E-02                            | 1.38E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 1.40E+03   | 1.38E+03  |
|                   | 2.534E-03                             | 1.08E+01                          | 1.27E-02                            | 1.64E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 1.65E+03   | 1.64E+03  |
|                   | 2.586E-03                             | 1.08E+01                          | 1.30E-02                            | 1.93E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 1.94E+03   | 1.93E+03  |
| 82 M <sub>4</sub> | 2.586E-03                             | 1.08E+01                          | 1.30E-02                            | 2.44E+03  | 0.00E+00                                     | 0.00E+00                                      | 2.45E+03   | 2.44E+03  |

Done Internet

**FIGURA 2.11** – Curvas de atenuação e tabela com dados de saída do programa Xcom (NIST).

Este programa foi utilizado para obter os coeficientes de atenuação das diferentes composições formuladas (compósitos e revestimento metálico).

## 2.3 OBTENÇÃO DO CHUMBO RECICLADO

### 2.3.1 CHUMBO

O chumbo é um elemento químico de símbolo Pb de coloração acinzentada quando exposto ao ar. Suas características são: número atômico 82, massa atômica igual a 207,2, funde-se com facilidade (327 °C), condutor térmico com coeficiente de expansão térmica linear de  $29 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , peso específico  $11,37 \text{ g/cm}^3$  e temperatura de vaporização a 1725 °C emitindo, antes desta temperatura, vapores tóxicos.

A alta ductibilidade e maleabilidade favorece o uso em forma de chapas pela facilidade de ser trabalhável, porém a flexibilidade pode resultar em baixa resistência, contribuindo para o surgimento de fissuras, quando submetido a repetidas aplicações de esforços mecânicos, tensão produzida pela vibração, resfriamento e dobramento alterados.

O chumbo tem a propriedade de absorver radiações ionizantes (raios X e  $\gamma$ ). Com essas características e com a facilidade de se combinar com outros elementos, esse metal é bastante empregado na indústria moderna, tanto puro, como sob a forma de composto, sendo um dos principais metais do grupo dos não-ferrosos.

Na natureza, o chumbo é encontrado sempre associado a outros elementos, tais como: a cerusita (carbonato de chumbo -  $\text{PbCO}_3$ ), a anglesita (sulfato de chumbo -  $\text{PbSO}_4$ ), a crocoisita (molibdato de chumbo -  $\text{PbMoO}_4$ ), o litargírio (óxido de chumbo -  $\text{PbO}$ ) e o zarcão (ortoplumbato de chumbo -  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ). Combinado com o enxofre, o chumbo ocorre sob a forma de sulfeto  $\text{PbS}$  (galena), que é o principal minério de chumbo.

O chumbo é o sexto metal de maior utilidade industrial. O seu uso principal é na construção de baterias para automóveis, que consomem em torno de 70 % em todo mundo (MACHADO, 2002). Na forma de ligas e compostos, o chumbo é empregado na fabricação de tintas e corantes, vidros especiais, cabos e munição. Ele pode ser endurecido pela adição de outros metais e ser utilizado como liga metálica, produzindo produtos, soldas e outros materiais. Além de ligas metálicas, vários compostos utilizando chumbo têm sido preparados e empregados na indústria química, cerâmica, etc. (EPA, 1998). Um exemplo do uso do chumbo na indústria cerâmica é o emprego do dióxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ) na composição de vidro em torno de 24 % desse óxido. Também, recente estudo desenvolvido por FRIMAIO (2006) utiliza o óxido de chumbo em composições cerâmicas.

O chumbo primário é definido como sendo o metal obtido diretamente do refinamento do minério, como a galena, cerusita e anglesita, os quais se encontram naturalmente na crosta terrestre. Após sua utilização, seja em forma de ligas ou compostos, o chumbo pode ser reciclado, mantendo suas características de chumbo primário, classificado como chumbo secundário.

Os principais produtores de chumbo primário: China, Austrália, EUA, Peru e México contabilizaram em 2006 uma produção de minério de chumbo de 3,5 milhões de toneladas. A produção brasileira primária, em 2006, foi de 16 mil toneladas de metal. Estas produções de chumbo primário provém da Mina de Morro Agudo, no município de Paracatu, Minas Gerais, que é totalmente exportada (DNPN, 2007).



A produção mundial de chumbo secundário, em 2006, foi de 4,5 milhões de toneladas, enquanto que a brasileira atingiu 142.653 toneladas (DNPN, 2007). A produção do chumbo secundário é proveniente da reciclagem de material usado, especialmente, de baterias automotivas, industriais e das telecomunicações, em usinas refinadoras nos estados de Pernambuco, São Paulo e Rio de Janeiro .

Sabe-se que o o chumbo polui o solo, a água e o ar e, dessa forma, contamina os organismos vivos, devido ao efeito bioacumulativo, em toda a cadeia alimentar (trófica). O chumbo não é um elemento essencial na nutrição e está presente na natureza em concentrações muito baixas.

A absorção do chumbo pode ocorrer por via digestiva quando ingerido e respiratória (partículas finas e gases). A absorção pela pele só é referida para o acetato de chumbo (MEDITEXT, 1998). Depois que entra, o chumbo pode ficar no corpo durante muito tempo. Ele pode ficar acumulado em três lugares: no sangue, nos órgãos e nos ossos. O chumbo fica no sangue por cerca de um mês. Nos órgãos, fica por vários meses. Já nos ossos, o chumbo permanece durante anos. Ele afeta o cérebro e o sistema nervoso, as funções reprodutivas, os rins, o aparelho digestivo e a capacidade do corpo de produzir sangue.

Os primeiros sinais de envenenamento por chumbo são: cansaço, dores de cabeça, gosto metálico na boca e perda de apetite. Os sinais tardios são: desconforto ou dores no estômago, prisão de ventre, dores nos músculos e nas juntas e problemas com a memória.

O risco de exposição a compostos de chumbo no interior das fábricas de baterias e empresas de reciclagem existe praticamente em todos os setores diretamente ligados à produção, portanto, se torna obrigatório o uso de equipamentos de proteção individual pelos funcionários.

Níveis aceitáveis de chumbo são regulamentados para a água pela Resolução CONAMA nº 357, de 17/03/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Uma concentração de chumbo no sangue menor que 10µg/dl é recomendada como aceitável pela OMS (Organização Mundial de Saúde), CDC (*Center for Disease Control*) e ACGIH (*American Conference of Governamental*

*Industrial Hygienists*). A ACGIH recomenda este limite também para mulheres grávidas (FAO/OMS, 1994).

Existem outros parâmetros biológicos citados na literatura que podem ser utilizados como método de avaliação complementar como, por exemplo: determinação de chumbo no cabelo e dentes, o aumento de ferro sanguíneo, a diminuição de hemoglobina, etc. (MACHADO, 2002).

A partir de 1986, para a instalação de indústrias poluidoras faz-se necessário o Estudo de Impacto Ambiental e o Relatório de Impacto Ambiental, bem como das medidas mitigadoras deste impacto (EIA/RIMA). Este relatório é analisado e julgada a pertinência das medidas para, só então, ser aprovado (CONAMA). As indústrias instaladas antes desta regulamentação não são obrigadas a seguir estes protocolos, exceto se comprovado algum dano ambiental, quando então podem ser submetidas à ação judicial por crime ao meio ambiente, podendo ser condenadas a corrigir ou ressarcir o dano causado. As indústrias instaladas antes desta regulamentação não são obrigadas a seguir estes protocolos, exceto se comprovado algum dano ambiental, quando, então, podem ser submetidas à Ação Judicial por crime ao meio ambiente, podendo ser condenadas a corrigir ou ressarcir o dano causado (MACHADO, 1982).

### 2.3.2 RECICLAGEM DE BATERIAS AUTOMOTIVAS – BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

WINCKEL e RICE (1998) afirmaram que o chumbo é o metal mais reciclado pela indústria no mundo, sendo que aproximadamente 80 % de todo o chumbo produzido é usado na fabricação de baterias automotivas e que nos EUA e Europa são recicladas em torno de 95% das baterias usadas.

Sabe-se que a reciclagem do chumbo é importante tanto do ponto de vista ambiental quanto do econômico. O Brasil não possui jazida comercialmente aproveitável do metal, o que obriga o país a importá-lo. O reaproveitamento não só alivia a balança comercial, como resolve um problema de disposição final do material, empregado principalmente na fabricação de baterias de automóveis, ônibus e caminhões (KREUSCH, 2005).

Pela grande participação do chumbo na massa ativa (óxido de chumbo e bióxido de chumbo) e do chumbo metálico, a recuperação desse minério nas baterias usadas recebeu crescente atenção nos últimos anos, pelo menos três - quartos da produção mundial de baterias são recicladas, por isso o chumbo oriundo da reciclagem (matéria-prima secundária) é um substituto barato do chumbo primário, o encontrado no ambiente natural (BAENAS, 2008).

Segundo MACHADO (2002), existem problemas no gerenciamento da reciclagem do chumbo. Para evitar a contaminação do ar e da água, as recicladoras devem contar com filtros, lavadores de gases e sistemas de exaustão e de tratamento de efluentes, processo que envolve custos elevados.

Resíduos gerados a partir do processo de obtenção e reciclagem de chumbo vêm sendo adicionados ao ambiente, contaminando o ar, a água e solo. O impacto das atividades de mineração e fundição pode persistir por longo período de tempo no ambiente (WHO, 1992).

As emissões de chumbo geralmente estão associadas à emissão de material particulado. As operações realizadas para obter chumbo primário, emitem material particulado e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), gerados nos fornos de queima e nas máquinas de sinterização. O controle da poluição, causado pelo material particulado, é realizado por meio de coletores centrífugos (ciclones) usados em conjunto com filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos (EPA, 1998).

Com relação ao processo de fundição de chumbo secundário, ocorre emissão em cada unidade de operação. As fundições de chumbo secundário utilizam algumas medidas para diminuir as emissões de chumbo, tais como: dispositivos de controle, modificações em processos e equipamentos, isolamento e automação de máquinas e áreas de trabalho, melhoria da ventilação local e geral e equipamentos de proteção individual.

As medidas de controle ambiental adotadas por algumas empresas brasileiras, que reciclam chumbo, estão dentro de um padrão razoável, mas ainda são insuficientes para evitar possíveis contaminações (MACHADO, 2002).

### 2.3.2.1 Processo de Reciclagem de Baterias Automotivas

Os principais objetivos são selecionar o material da bateria passível de reciclagem, separar o chumbo de outros metais e contaminantes e minimizar a emissão de poluentes (MACHADO, 2002).

O processo de reciclagem consiste, inicialmente, na separação dos diversos componentes de que é feita a bateria automotiva (Figura 2.12). Posteriormente, parte deste material é triturado (sucata) e as peças plásticas, as placas positivas e negativas (grades feitas com uma liga de PbO) e a pasta são recicladas. A fração metálica é composta de aproximadamente 40 % de ligas de chumbo e 60 % de óxido de chumbo.

O chumbo é separado, fundido, refinado e transformado em lingotes para a fabricação de novas baterias. A solução ácida (ácido sulfúrico) é estocada e neutralizada, filtrada para recuperação dos óxidos e depois retorna para reutilização. Ao longo desse trabalho, ocorrem emissões de gases e efluentes, ambos contaminados com o chumbo. Esse processo deve ser realizado por recicladores autorizados e devem atender aos requisitos da legislação ambiental.



**FIGURA 2.12** – Componentes de uma bateria ácida de chumbo (ABINEE, 2008).

A Tabela 2.1 mostra a composição média de uma bateria de chumbo-ácido para automóveis.

**TABELA 2.1** – Composição média de uma bateria de chumbo ácido para automóveis (JOLLY e RHIN, 1994).

| COMPONENTES                                       | MASSA (%) |
|---|-----------|
| Chumbo  | 61,2      |
| Água  | 13,3      |
| Ácido sulfúrico puro                              | 9,6       |
| Caixa de polipropileno                            | 8,2       |
| Grelha metálica (Sb, Sn, As)                      | 2,1       |
| Polietileno (separadores)                         | 2,0       |
| Conexões (Cu)                                     | 0,3       |
| Outros materiais (plásticos, papel, madeira, PVC) | 3,3       |

Todos os estabelecimentos que comercializam baterias automotivas são obrigados a aceitar a devolução de baterias usadas de qualquer marca (Resolução CONAMA n° 257, de 1999), e preservar a solução ácida (não jogando em esgotos, nem adicionando água). Dessa forma, pode ser garantido o manuseio de forma adequada, evitando o tombamento das baterias em qualquer situação de armazenamento ou transporte, para que não haja vazamento da solução ácida.

### 2.3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS COM RELAÇÃO AO MEIO AMBIENTE

Para que um produto, feito a partir de material reciclado, seja aceito após avaliação ambiental, este deve ter a comprovação de que as substâncias nocivas presentes não prejudicarão o meio ambiente, após o processo de reciclagem. Esta avaliação é de suma importância, devendo seguir as recomendações da norma ABNT NBR 10004/2004.

A norma adota a seguinte classificação:

Classe I – PERIGOSOS: quando apresentam, em função de suas propriedades físico-químicas ou infecto-contagiosas, risco à saúde pública ou risco ao meio ambiente, quando gerenciados de forma inadequada.

Classe II – NÃO PERIGOSOS: divididos em:

Classe IIA – Não Inertes: são aqueles que podem ter propriedade de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Classe IIB – Inertes: são resíduos que, submetidos ao contato dinâmico e estático com a água destilada, na temperatura ambiente, e no extrato solubilizado, não apresentam nenhum de seus constituintes superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G, da norma de referência.

Para se obter a classificação dos resíduos, faz-se necessário conhecer do que são feitos os materiais, insumos e identificação do processo que deu origem ao resíduo. Deve-se atentar ao impacto com relação à saúde e ao meio ambiente. Estes parâmetros são determinados pelos métodos: ABNT NBR 10005/2004 – Procedimento para obtenção do extrato lixiviado e ABNT NBR 10006/2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado dos resíduos sólidos.

## 2.4 MATERIAIS COMPÓSITOS

É importante distinguir o significado dos termos *composição* e *compósito*. O termo *composição* é amplo e geral, e se aplica a quaisquer misturas, poliméricas ou não. O termo *compósito* se refere a materiais formados por dois ou mais componentes, com identidade química e forma diferentes, que se conservam distintos após o processamento e que são separados por uma interface mais ou menos definida (FERRANTE, 1996). Um dos componentes do compósito é descontínuo e dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural ou reforço) e o outro componente é contínuo e representa o meio de transferência desse esforço (componente matricial ou matriz). Esses componentes não se dissolvem nem se descaracterizam completamente; apesar disso, atuam concertadamente, e as propriedades do conjunto são superiores às de cada componente individual, para uma determinada aplicação (MANO *et al.*, 1999).

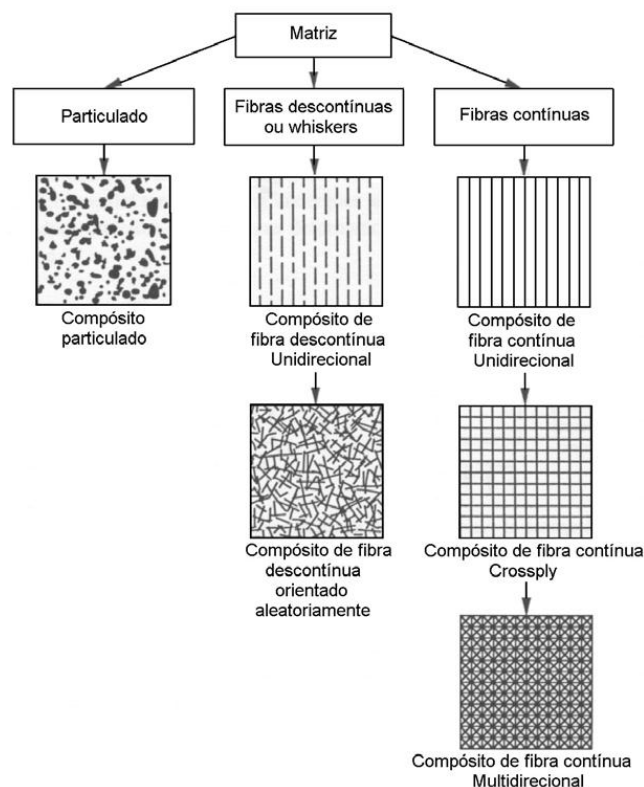
CHAWLA (1987) define compósito como sendo um material fabricado e que consistem de duas fases química e/ou fisicamente distintas, devidamente arranjadas ou distribuídas, com uma interface de separação entre elas, resultando em características diferenciadas das de seus componentes isoladamente. MATTHEWS

*et al.* (1994) destacam que os constituintes desses materiais têm, normalmente, que estar presentes em proporções maiores que 5 %.

Os materiais compósitos são formados por duas fases: uma denominada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, denominada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes (KATZ *et al.*, 1987).

MARK (2000) atribuiu o comportamento e as propriedades dos compósitos a três fatores: propriedades intrínsecas dos constituintes, a forma e o arranjo estrutural dos constituintes, e a interação entre os constituintes. As propriedades dos constituintes determinam, em geral, a ordem ou o limite das propriedades dos compósitos. A forma (formato e tamanho), o arranjo estrutural e a composição e distribuição dos constituintes dão ao compósito sua versatilidade e contribuição ao desempenho total. A interação entre os constituintes também altera as propriedades mecânicas do compósito.

Os materiais compósitos podem ser classificados em três categorias gerais, conforme mostrado na Figura 2.13.



**FIGURA 2.13** – Classificação dos materiais compósitos, segundo DANIEL e ISHAII (1994).

*Compósitos de fibras descontínuas (whiskers):* contêm pequenas fibras como reforçadoras.

*Compósitos de fibras contínuas:* compósitos reforçados por longas fibras contínuas, sendo os mais eficientes sob o ponto de vista de rigidez e força. As fibras podem ser orientadas paralelamente (unidirecional), formando ângulos retos entre si (*crossply*) ou distribuídas em várias direções (multidirecional).

*Compósitos particulados:* consistem de partículas de vários tamanhos e formas, dispersas aleatoriamente dentro de uma matriz.

As propriedades mecânicas e térmicas de um material são necessárias para comprovar sua eficácia nos projetos de engenharia. Quando se trata de um material conhecido, essas características estão disponíveis na literatura. No caso de novos compósitos, devido à combinação de propriedades de dois ou mais materiais distintos, estas informações disponíveis não se aplicam, pois as propriedades efetivas do compósito variam em função da fração volumétrica de fibra/partículas e matriz (ALMEIDA *et al.*, 1998).

Vários pesquisadores têm proposto modelos e equações para calcular diversas propriedades (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento, módulo de deformação volumétrica, coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica). Essas equações vão desde a variação linear das propriedades em função da fração volumétrica dos constituintes (regra da mistura), até equações mais complexas, que fornecem limites superiores e inferiores das propriedades e, muitas vezes, leva em conta o efeito da interface fibra/matriz que surge devido a reações químicas entre os mesmos (HASHIN, 1983).

O compósito desenvolvido nessa pesquisa foi formulado a partir de uma matriz polimérica associada a um material particulado, no caso o resíduo de chumbo.

## 2.4.1 MATRIZES POLIMÉRICAS USADAS NA PESQUISA

### 2.4.1.1 Borracha de Silicone

Dentre todos os tipos de materiais poliméricos, as borrachas, ou elastômeros, se distinguem por sua característica única de permitir grande alongamento, seguido instantaneamente de quase completa retração. Exibe



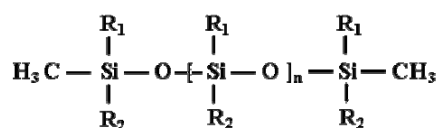
*elasticidade*, que é a capacidade que têm certas estruturas químicas de permitir grande deformação sob baixa tensão e, removida a força, retornar quase instantaneamente à condição inicial, sem perda significativa de forma e dimensões, em um processo reversível. Após a reticulação, em muito baixo grau, as cadeias poliméricas tornam-se "presas", impedidas de escoar, o que evita a deformação permanente e confere as características borrachosas ao material. A reação de reticulação é, geralmente, promovida por enxofre e denominada *vulcanização*.

As borrachas sintéticas mais importantes são de estrutura polidiênica, tal como a borracha natural, e são obtidas por poliadicação (MANO *et al.*, 1999). Apresentam, após a cura, boa elasticidade, flexibilidade e resistência química.

Os silicones são produzidos por um processo de quatro etapas:

- ✓ produção de clorosilanos, pequenas moléculas que formam as ligações nas cadeias poliméricas;
- ✓ hidrólise e policondensação desses clorosilanos que, dependendo do processo utilizado, geram óleos, gomas ou resinas;
- ✓ preparação de misturas físicas e químicas, para permitir que o produto adquira as propriedades e texturas desejáveis;
- ✓ processamento final (cura, secagem, etc.), que ocorre quando o produto é aplicado ou processado.

São compostos de semiorgânicos tendo o silício na cadeia principal,, combinado com o oxigênio. São fabricados a partir da areia de sílica e do cloreto de metila, não derivando essencialmente do petróleo. O tipo principal de silicone constitui-se de cadeias lineares de átomos de silício e oxigênio alternados (siloxanas) com radicais metila ligados aos átomos de silício, conforme a estrutura química mostrada na Figura 2.14.



**FIGURA 2.14** – Estrutura química do silicone (SBRT, 2008).

onde :

**n** varia de 0 a 40.000 nos óleos.

**R<sub>1</sub>** e **R<sub>2</sub>** são usualmente os radicais orgânicos: metil, fenil, vinil, fluoropropil, hidroxila, halogênio.

A estabilidade térmica é, de longe, a maior qualidade dos silicones, os quais, na maioria dos casos, podem ser usados a temperaturas entre – 50 °C e + 250 °C, sem sofrer alterações em seu estado físico. Há aplicações em que alguns silicones podem ser usados entre – 160 °C e + 400 °C.

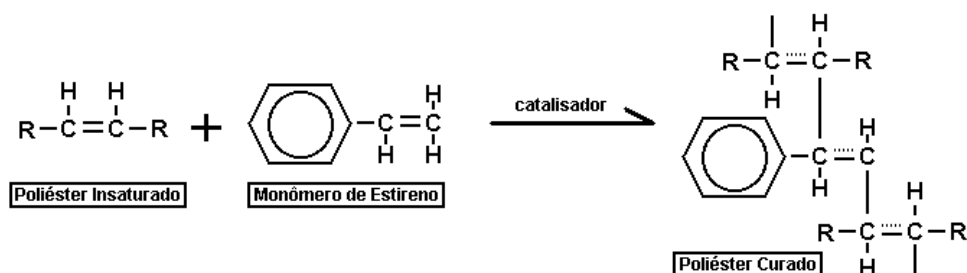
#### 2.4.1.2 Resina de Poliéster

O poliéster é obtido por meio de uma reação de condensação de um poliálcool e um ácido policarboxílico. Dependendo da formulação inicial, pode-se obter um poliéster saturado ou insaturado.

*Poliéster Saturado:* Ocorre pela reação entre um biálcool e um biácido saturado, resultando num produto termoplástico, cuja cadeia molecular é composta apenas por simples ligação entre os átomos de carbono, o que o torna mais flexível. Pode ser utilizado com ou sem reforço. São empregados na confecção de filmes, fibras sintéticas, plastificantes (poliméricos) e produtos de engenharia.

*Poliéster Insaturado:* Consiste num polímero alquídic, contendo insaturações vinílicas, dissolvidas em um monômero reativo normalmente, o monômero de estireno. É obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por simples e duplas ligações entre os átomos de carbono. É encontrado inicialmente no estado líquido e após a adição de um catalisador, transforma-se em um material termofixo irreversível. É utilizado em fundição de artesanato, decoração e construção civil.

O poliéster insaturado é produzido quando qualquer dos reagentes contém insaturações. A denominação insaturada é proveniente da presença de duplas ligações presentes na sua cadeia molecular. A insaturação do poliéster é fornecida, geralmente, pelo ácido ou anidrido maleico, assim como pelo seu isômero, ácido fumárico. A Figura 2.15 mostra a estrutura química do poliéster insaturado.



**FIGURA 2.15** – Estrutura química do poliéster insaturado (SILAEX, 2008).

O processo de cura do poliéster inicia-se pela adição de um catalisador. A cura se dá na temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas, com ou sem aplicação de pressão (MENDONÇA, 2005).

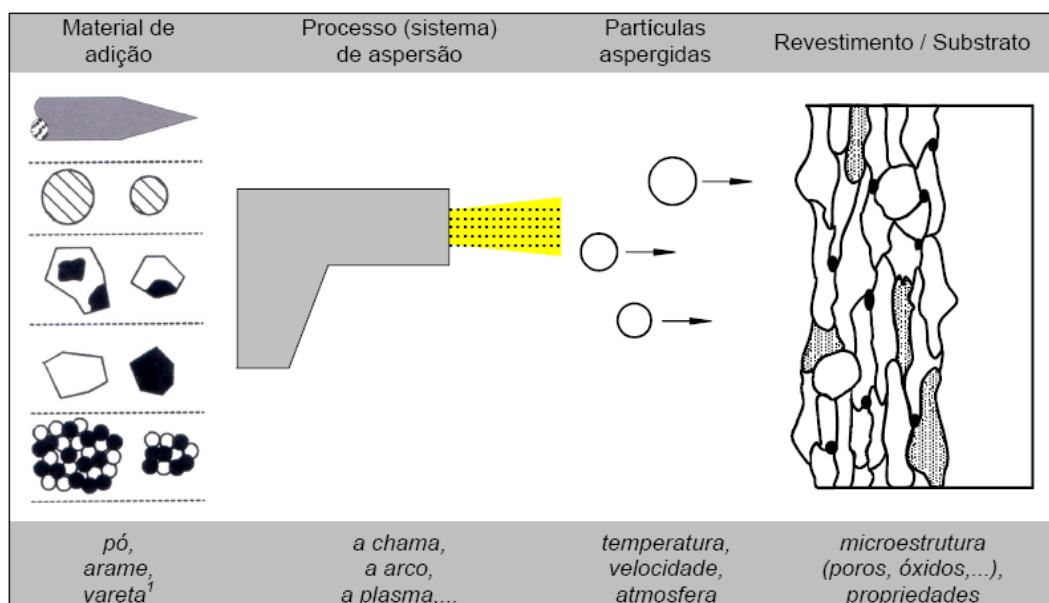
Nesta pesquisa, foi utilizado o poliéster insaturado na sua fase solúvel com o monômero de estireno, que também possui insaturações, e que são sistemas de resinas líquidas catalisáveis a temperatura ambiente ou com pequena elevação, para torná-los termoestáveis, sem a necessidade de sistemas complexos de catalisação e transformação.

## 2.5 ASPERSÃO TÉRMICA

Aspersão térmica (AT) é um grupo de processos utilizados para a deposição de revestimentos metálicos ou não-metálicos em substrato previamente preparados. Nestes processos, o material do revestimento, na forma de pó ou arame, é fundido por uma fonte de calor química (chama de gases a combustão) ou elétrica (arco ou plasma) e impulsionado por um fluxo de gás de alta pressão (ar comprimido ou outros gases especiais) de encontro a uma superfície a ser revestida. As partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e velocidade imposta às partículas que, pela sobreposição, formam camadas de estrutura lamelar

HEINRICH, 1992; CLARE *et al.*, 1982; MAYER, 1982). Em consequência desse processo de deposição, o revestimento formado normalmente contém imperfeições tais como poros, óxidos e trincas, cujos tamanhos e

distribuições influenciam decisivamente no seu desempenho em serviço (KREYE *et al.*, 2001). A Figura 2.16 mostra a sequência de deposição de um revestimento por aspersão térmica.



**FIGURA 2.16** - Sequência esquemática de deposição de um revestimento na aspersão térmica (Adaptada de ZIMMERMANN, 1997).

Os processos de aspersão térmica podem ser categorizados em dois grupos básicos, de acordo com o método de geração de calor:

- Grupo I ou de Combustão: chama (chama convencional e oxicomcombustível de alta velocidade) e detonação.
- Grupo II ou Elétrico: plasma de arco não-transferido (PSP ou Plasma Spray), plasma de arco transferido (PTA, Plasma Transferred Arc) e arco elétrico.

O primeiro grupo utiliza gases combustíveis como fonte de calor. Os processos utilizando energia elétrica como fonte de calor constituem o segundo grupo. Neste grupo, os consumíveis utilizados são na forma de pó ou arame (HENRICH, 1992; SMITH *et al.*, 1991 e LUGSHEIDER *et al.*, 1991). Na Figura 2.17 é mostrado um esquema da classificação dos processos. Os processos apresentados têm a identificação por meio de siglas, que são:

FS - *Flame Spraying* (aspersão a chama oxigênio-gás com material de adição na forma de pó ou arame);

AS - *Arc Spraying* (aspersão a arco elétrico);

HVOF - *High Velocity Oxy-Fuel* flame spraying (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de pó);

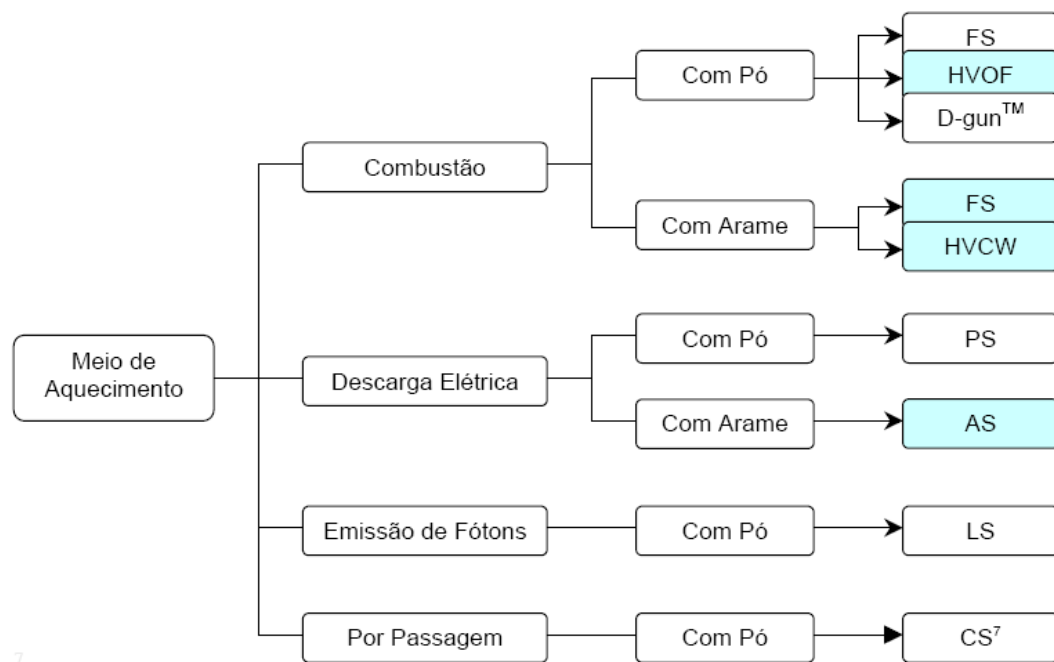
HVCW - *High Velocity Combustion Wire* flame spraying (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de arame);

PS - *Plasma Spraying* (aspersão a plasma);

D-gun<sup>TM</sup> - *Detonation-Gun* spraying (aspersão por detonação);

LS - *Laser Spraying* (aspersão a laser);

CS - *Cold Spraying* (aspersão a frio).



**FIGURA 2.17** - Classificação dos principais processos de aspersão térmica com relação ao meio de aquecimento, associado ao tipo de material de adição empregado. (SCHIEFLER, 2004).

Os parâmetros característicos de alguns desses processos, bem como algumas propriedades dos revestimentos estão reunidos na Tabela 2.2.

**TABELA 2.2** - Parâmetros e propriedades dos processos de aspersão térmica (CLARE *et al.*, 1982; BRITTON, 1988; BORBECK, 1990; GRASME, 1990; KREYE, 1990; THORPE, 1993; HOEHNE, 1985; PARKER *et al.*, 1991 e AMIN, 1992).

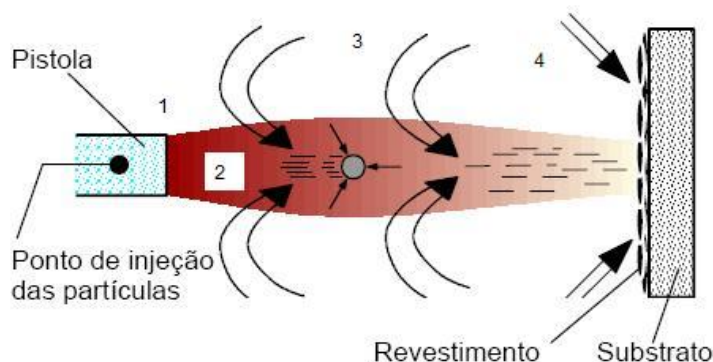
| Processos                       | FS                                      |  | HVOF   | ARCO ELÉTRICO                   |
|---------------------------------|---|--|--|---------------------------------|
|                                 | PÓ                                      | ARAME  | PÓ   | ARAME                           |
| Temperatura da Chama/ Arco (°C) | 2200 - 3200                             | 2800 - 3200  | 2700 - 3100  | 4000 - 6000                     |
| Velocidade das partículas (m/s) | 30 - 150                                | 180 - 250  | 600 - 1200   | 100 - 250                       |
| Atmosfera da Chama / Arco       | CO – CO <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> - CO – CO <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> - CO – CO <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> - O <sub>2</sub> |
| Aderência (MPa)                 | 4 - 20                                  |  | 70 - 100   | 10 - 36                         |
| Teor de Óxidos (%)              | 6 – 15 (0,4)                            | 4 – 15 (0,4)   | 0,2 - 5  | 10 – 20 (0,5 – 3)               |
| Porosidade (%)                  | 5 - 15                                  | 5 - 15   | 0 - 2  | 10 – 15 (2 – 3)                 |

No processo de AT são utilizados vários gases industriais, cada um com uma finalidade, podendo conferir ao revestimento características distintas. Segundo HEINRICH (1997), os principais gases utilizados são:

- *Gases de combustão* – fornecem energia térmica para o aquecimento e ativação térmica do material a ser aspergido;
- *Gases de arraste* – conduzem o material a ser aspergido até o fluxo de gás aquecido ou plasma;
- *Gases de resfriamento* – fazem o resfriamento do substrato ou do próprio revestimento durante/após o processo de aspersão;
- *Gases de proteção* – empregados na formação de uma cortina gasosa de proteção durante o processo, evitando, por exemplo, o acesso de oxigênio proveniente da atmosfera.

As propriedades finais e características estruturais dos revestimentos são influenciadas pelo tipo de energia térmica e cinética transferidas às partículas durante ao processo de aspersão, bem como pelo tipo de processo e parâmetros selecionados para a execução do revestimento.

Para processos que utilizam a combustão de gases (chama) como meio de aquecimento pode ocorrer a oxidação das partículas em função da presença de oxigênio, desde o aquecimento do material na pistola até a sua deposição no substrato. A intensidade tanto da oxidação como da ativação térmica vai depender do grau de fusão das partículas aspergidas e da velocidade de resfriamento do material (SCHIEFLER, 2004). A oxidação nos revestimentos pode influenciar a composição de fase, a microestrutura, as propriedades e então a performance das camadas. (RODRIGUEZ, 2003) Óxidos interiores da camada modificam as propriedades do material depositado se comparado com o material de base. Camadas de óxidos frágeis podem reduzir potencialmente a força e ductilidade do depósito. Em alguns casos, entretanto, óxidos metálicos aprimoram certas propriedades como resistência ao desgaste ou força sob carga compressiva (DESHPANDE *et al.*, 2005). RODRIGUEZ (2003) dividiu os processos de oxidação em quatro possibilidades (mecanismos), ou zonas de oxidação, como é mostrado na Figura 2.18:



**FIGURA 2.18** - Principais fontes de oxidação das partículas aspergidas em processos que utilizam a combustão de gases como meio de aquecimento (adaptado de KREYE, 1997 e RODRIGUEZ, 2003).

- 1 - No interior da chama: partículas que têm o primeiro e mais relevante contato com ambiente oxidativo.
- 2 - Oxidações entre a partícula e o gás de transporte (geralmente ar comprimido). Há a reação entre a partícula e oxigênio ou elementos oxidantes presentes nos gases expelidos pela pistola. Ambiente que envolve a zona de transferência.

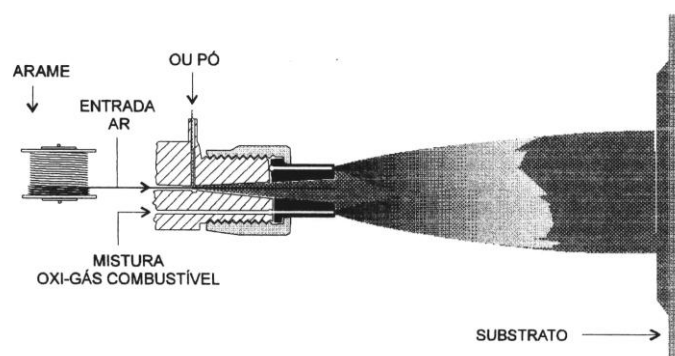
3 – Presença de oxigênio no meio ambiente que envolve a zona de transferência das partículas devido ao fluxo turbulento dos gases.

4 - Partículas e/ou camadas já ancoradas ao substrato e que ficam expostas ao oxigênio do meio ambiente após o deslocamento da partícula.

As contribuições individuais desses diferentes mecanismos de oxidação para o teor de oxigênio residual de um revestimento dependem não somente dos parâmetros de aspersão, mas também do tipo de metal que está sendo depositado (SCHIEFLER, 2004).

### 2.5.1 PROCESSO UTILIZADO NA PESQUISA - Aspersão à Chama - FS

No processo de aspersão térmica à chama oxigênio-gás (FS) utiliza-se um gás (normalmente gás acetileno) para promover uma chama para fundir o material consumível (arame ou pó). No mesmo momento, é gerado um fluxo de ar (ar comprimido ou gás inerte) que tem por finalidade atomizar o material e impulsionar as gotas na direção do substrato (MARANHO, 1996). A Figura 2.19 mostra a representação esquemática de aspersão à chama convencional (FS).



**FIGURA 2.19** - Esquema da pistola de aspersão à chama (FS) com arame ou pó (MAYER, 1982).

A entrada de gás é axial; o pó pode ser introduzido axialmente ou radialmente na tocha. Arames ou varetas podem ser usados em vez de pós, sendo introduzidos axialmente. As partículas de material são fundidas na chama e aceleradas em direção ao substrato. A relação da mistura oxigênio-combustível pode variar na faixa de 1:1 a 1, resultando numa atmosfera carburante ou oxidante, respectivamente. As tochas de aspersão por chama, em sua maioria, podem ser



adaptadas para usar diversas combinações de gases, tendo em vista a otimização dos custos e a qualidade do revestimento. Os gases utilizados como combustível são: propano, gás natural, hidrogênio e acetileno. Destes, o que mais se usa na prática é o acetileno que, pelo maior poder calorífico, produz chamas com temperatura de até 3.200 °C, além de ter baixo custo.

Este processo provoca o surgimento de um maior teor de óxidos nos revestimentos. Durante o resfriamento, esses óxidos, bem como as partículas que se apresentam no estado semifundido, são responsáveis por um grau de porosidade mais elevado, uma vez que impedem as partículas aspergidas subsequentes de preencherem adequadamente os interstícios criados a sua volta (SCHIEFLER, 2004)

Outro ponto a ser destacado neste processo é o mecanismo de aderência que, devido às baixas temperaturas e velocidades das partículas, se processa primeiramente por ancoragem (mecanismo mecânico) exigindo uma limpeza rigorosa e rugosidade apropriada do substrato.

Apesar dessas deficiências, o processo FS apresenta valores de aderência satisfatórios para serviços de menor responsabilidade. Além disso, é um processo ainda muito utilizado pela sua versatilidade, baixo custo, fácil manutenção e obtenção de altas taxas de deposição (CLARE *et al.*, 1982).

Na presente pesquisa, foi utilizado o modelo de pistola 6P-II (pó com alimentador) Thermospray® Guns da Sulzer Metco, conforme Figura 2.20. Este tipo de pistola permite a aplicação manual ou automatizada.

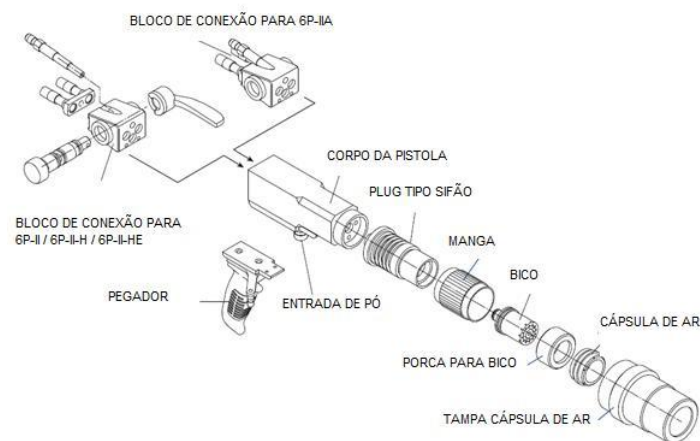


**FIGURA 2.20** – Modelo de pistola 6P-II (Thermospray® Guns da Sulzer Metco).

Este equipamento pode ser usado para aplicar revestimentos para resolver muitos problemas, incluindo reparações em superfície de elementos de máquina, restauro dimensional, proteção contra corrosão e resistência ao desgaste abrasivo.

Econômica para operar, a pistola 6P-II apresenta baixas taxas de consumo de gás e alta eficiência de deposição.

O modelo 6P-II pode ser usado com qualquer gás combustível, como: acetileno ou hidrogênio. O hidrogênio é recomendado para a pulverização de materiais com pós finos. A Figura 2.21 mostra as partes constituintes de uma pistola Thermospray® Guns da Sulzer Metco.



**FIGURA 2.21** – Componentes de uma pistola Thermospray® Guns da Sulzer Metco.

A cápsula de ar no interior da pistola tem por objetivo adequar a forma da chama para diferentes aplicações. A cápsula, utilizada para a maioria dos revestimentos, prevê diversos graus de arrefecimento do ar sem interferir com a chama. A cápsula de ar reversível pode ser usada para criar um fluxo paralelo de ar para esfriar a peça ou convergir os materiais finos, para aumentar a eficiência de pulverização de certos materiais, tais como carbonetos.

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa tem por finalidade estudar as propriedades de atenuação de materiais constituídos por polímeros e/ou metais com resíduos de chumbo na forma de pó (reciclagem de baterias).

Estes compósitos e revestimentos metálicos poderão, depois de comprovada sua eficácia, ser usados como elementos de atenuação de barreiras de proteção e blindagens contra radiações ionizantes (raios X e  $\gamma$ ) em ambientes hospitalares, odontológicos e industriais.

Com base no objetivo proposto, estabeleceu-se a metodologia do trabalho constituída das seguintes etapas:

- ✓ Caracterização do resíduo de chumbo (pó) por meio dos ensaios de análise química por fluorescência de raios X, análise mineralógica por difratometria de raios X e análise granulométrica, por difração de raio laser.
- ✓ Determinação da densidade experimental do resíduo de chumbo (pó) com o frasco volumétrico de Le Chatelier.
- ✓ Determinação da densidade experimental dos polímeros (silicone e poliéster), pelo método de pesagem e medição volumétrica manual dos corpos de prova.
- ✓ Moldagem inicial dos compósitos poliméricos com diferentes teores de resíduo de chumbo.
- ✓ Confeção inicial dos revestimentos metálicos com diferentes espessuras de resíduo de chumbo (função do número de camadas aspergidas).
- ✓ Determinação da densidade experimental dos compósitos poliméricos pelo método de pesagem e medição volumétrica manual dos corpos de prova.
- ✓ Cálculo da fração volumétrica de vazios nos compósitos poliméricos.
- ✓ Avaliação inicial das propriedades de atenuação dos compósitos moldados, por meio da irradiação das amostras em equipamentos de raios X (imagens radiográficas) e gama.

- ✓ Processamento final dos compósitos poliméricos e de revestimentos metálicos, em função das melhores respostas de atenuação.
- ✓ Caracterização química e mineralógica dos compósitos poliméricos e revestimentos metálicos.
- ✓ Confeção de corpos de prova de chumbo sólido, para servir como material de referência (material comumente utilizado para proteção radiológica).
- ✓ Caracterização química e mineralógica do chumbo sólido.
- ✓ Avaliação final das propriedades de atenuação dos compósito, revestimentos e do material de referência (chumbo sólido), por meio da irradiação das amostras em equipamentos de raios X (industrial e imagens radiográficas) e gama.
- ✓ Avaliação da atenuação da radiação X dos compósitos, revestimentos metálicos e do chumbo sólido, utilizando o programa Xcom.
- ✓ Avaliação das propriedades mecânicas dos revestimentos metálicos.
- ✓ Avaliação das propriedades calorimétricas dos compósitos e do material de referência (chumbo sólido).
- ✓ Avaliação das características morfológicas dos compósitos e do material de referência (chumbo sólido).
- ✓ Classificação dos resíduos sólidos, por meio do procedimento de lixiviação e solubilização dos compósitos poliméricos.

### 3.2 MATERIAIS

Para a confecção dos corpos de prova para obtenção de um compósito polimérico, foram escolhidos a borracha de silicone branca N-2 (Marca CS1000) (**SI**) e a resina cristal (poliéster insaturado ortoftálica - **UP**) RPF – AZ 1.0#11 (Marca Ara Ashland), adquirido da empresa Casa do Silicone. Já para o material composto do revestimento de pó de chumbo metálico, foram usadas placas de aço 1020. Ambos os compósitos foram preparados com resíduo de chumbo na forma de pó, obtido por meio da reciclagem de baterias (material obtido por meio de atomização de partes de chumbo de baterias usadas), cedido pela empresa Rondopar Energia Acumulada Ltda.

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICAS DOS MATERIAIS

#### 3.2.1.1. Análise Química por Fluorescência de Raios X

Na realização das análises, utilizou-se o método semiquantitativo para os materiais de referência e para os compósitos. Para obter a composição química quantitativa dos compósitos selecionados, foi feita a análise química por espectrometria de fluorescência de raios X - FRX Philips PW 2400 no LAMIR - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas da Universidade Federal do Paraná (UFPR). É um método para determinação precisa, rápida e não-destrutiva para análises elementares, tanto quantitativas quanto qualitativas usando o princípio de medida dos comprimentos de onda e intensidade das radiações emitidas pelos elementos. Através de um detetor apropriado, pode-se medir este comprimento de onda, e conseqüentemente identificar os elementos (análise qualitativa). Como a intensidade dos raios-X fluorescentes é proporcional a concentração a cada desses elementos, pode-se, portanto, quantificar estes elementos. Os equipamentos mais modernos são dotados de sistemas informatizados de aquisição de dados e processamento, fazendo uso de uma biblioteca interna, o que permite obter resultados quase que em tempo real.

Os compósitos poliméricos iniciais e finais foram preparados na forma de pastilhas, conforme prescreve o procedimento de análise em FRX. Os resultados obtidos são apresentados em forma de óxidos mais estáveis dos elementos químicos presentes.

A perda ao fogo foi feita somente para os compósitos finais de poliéster, pela medida da perda de massa com aquecimento até 1.000°C, em mufla marca Biotec do LAMIR. No caso dos compósitos feitos com silicone, houve a evaporação total do material, sem haver a possibilidade de quantificação de massa residual.

#### 3.2.1.2. Análise Química por Energia Dispersiva de Raios (EDS)

Para a análise química, utilizou-se o método quantitativo para os compósitos metálicos. Para os compósitos selecionados, foi feita a análise por energia dispersiva de raios X – EDS, utilizando o microscópio eletrônico de varredura Philips

XL 30, do Laboratório de Materiais do LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

#### 3.2.1.3 Análise Mineralógica

A análise mineralógica do resíduo de chumbo na forma de pó foi feita no difratômetro de raios X – DRX Philips Analytical X-Ray B.V., do LAMIR - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, da UFPR. O difratograma com os principais picos obtidos na análise da amostra foram obtidos com os padrões ICDD (*International Center for Diffraction Data*).

#### 3.2.1.4 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do resíduo de chumbo na forma de pó foi feita por difração de raio laser - Granulômetro CILAS 1064, do LAMIR - Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, da UFPR.

#### 3.2.1.5 Análise Morfológica

Para a observação das estruturas (metalografia), quantidade de poros no material de revestimento, medida das espessuras das camadas depositadas e controle do processo de aspersão térmica dos revestimentos metálicos, foi utilizado um microscópio ótico Olympus BX 51M com câmera digital, do LaMaTS - Laboratório de Materiais e Tratamentos Superficiais, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

A análise da morfologia e das estruturas dos materiais de referência e dos compósitos poliméricos e revestimentos metálicos foram feitos utilizando o microscópio eletrônico de varredura Philips XL 30 do Laboratório de Materiais do LACTEC.

#### 3.2.1.6 Análise Térmica

Para a caracterização dos compósitos poliméricos, no que se refere à avaliação das propriedades físicas com a variação da temperatura, foi utilizada a

técnica DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial do Laboratório de Materiais, do Departamento Acadêmico de Química, da UTFPR.

### 3.2.1.7 Densidade do Resíduo de Chumbo na Forma de Pó (experimental)

A densidade aparente do resíduo de chumbo na forma de pó foi obtida seguindo as recomendações da norma NM 23:2000, que trata sobre a determinação da massa específica do cimento portland e outros materiais em pó.

Para a determinação da massa específica, foi utilizado o frasco volumétrico de Le Chatelier. A massa específica do resíduo de chumbo (pó) foi calculada a partir da equação (3.1) e expressa com duas casas decimais, segundo recomendação da norma.

$$\rho = m/V \quad (3.1)$$

onde

$\rho$  é a massa específica do material ensaiado, g/cm<sup>3</sup>;

$V$  é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ( $V_2 - V_1$ ), cm<sup>3</sup>;

$V_1$  e  $V_2$  são os valores corrigidos de  $V_1$  e  $V_2$ , respectivamente, a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, cm<sup>3</sup>.

### 3.2.1.8 Densidade do Silicone e do Poliéster (experimental)

A densidade do silicone e do poliéster foi calculada a partir da moldagem de corpos de prova prismáticos. Estes corpos de prova foram pesados em balança de precisão, marca PRECISION PR 1000NW e medidos por meio de paquímetro, marca VERNIER CALIPER.

A densidade  $D$  (g/cm<sup>3</sup>) foi calculada empregando a equação 3.2,

$$D = m/V \quad (3.2)$$

onde

$m$  é a massa (g) do corpo de prova e

$V$  é o volume (cm<sup>3</sup>), obtido pelo produto do comprimento (cm), da largura (cm) e da espessura (cm).

### 3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

A caracterização dos revestimentos metálicos foi feita por meio de ensaios de dobramento, medição da rugosidade, da dureza e da espessura média do revestimento.

#### 3.2.2.1 Ensaio de Dobramento

Para o ensaio de dobramento foi utilizado um equipamento montado no Laboratório de Aspersão Térmica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da UFPR, conforme mostrado na Figura 3.1.



**FIGURA 3.1** – Equipamento para o ensaio de dobramento.

O ensaio de dobramento fornece uma avaliação qualitativa da ductilidade do revestimento, com a apresentação ou não de trincas na superfície da camada. A metodologia do ensaio seguiu o recomendado pela norma Petrobrás N-2568 (1995). Os critérios de avaliação constam da Tabela 3.1.

**TABELA 3.1** – Critério de avaliação das amostras após o ensaio de dobramento.

| CONDIÇÃO  | APARÊNCIA DA SUPERFÍCIE  |
|-----------|--|
| IDEAL     | Sem microtrincas ou microtrincas superficiais.                     |
| MARGINAL  | Contém microtrincas sem desgarramento ou delaminação da camada.    |
| REJEITADA | Contém trincas e fendas com desgarramento e delaminação da camada. |



### 3.2.2.2 Rugosidade

A medição da rugosidade superficial dos revestimentos, pós jateamento abrasivo, foi realizada com o auxílio do rugosímetro digital MITUTOYO SJ-201, mostrado na Figura 3.2, seguindo as recomendações da Norma DIN 4768(1990).



**FIGURA 3.2** – Rugosímetro utilizado para as leituras de rugosidade.

Foram feitas dez leituras em posições aleatórias no substrato (aço carbono) e outras dez após a deposição do revestimento (resíduo de chumbo na forma de pó).

Nas medições de rugosidade foram avaliados o desvio médio aritmético  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ), a altura das irregularidades em dez pontos  $R_y$  ( $\mu\text{m}$ ) e a altura máxima das irregularidades  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ).

$R_a$  é freqüentemente utilizado internacionalmente, significando a média aritmética do desvio apresentado pelo perfil de rugosidade a partir da linha média (SCHIEFLER, 2004).

### 3.2.2.3 Dureza Vickers

A medição da dureza *Vickers* é aplicável a todos os materiais metálicos, de qualquer dureza, especialmente para materiais muito duros ou muito moles, muito finos, pequenos e irregulares, como é o caso do resíduo de chumbo em pó. As medições foram realizadas diretamente sobre a seção transversal de amostras metalográficas. Essa técnica emprega um indentador piramidal de diamante, o qual é impelido por uma carga padronizada e penetra na superfície polida da amostra,

produzindo uma pequena deformação plástica na forma de um losango (indentação). Para cada amostra, cinco pontos foram ensaiados ao longo de uma linha eqüidistante da superfície do revestimento e da interface deste com o substrato.

A medida da microdureza foi feita no Labats – Laboratório de Aspersão Térmica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da UFPR.

A microdureza foi determinada a partir de tabelas que fornecem o valor da dureza *Vickers* em função da média das cinco medições das diagonais da impressão formada e da carga utilizada, no caso, 300 g.

#### 3.2.2.4 Espessura Média do Revestimento

A espessura dos revestimentos foi estimada por microscopia ótica (ASTM B487, 2007), com análise visual direta da seção transversal de amostras metalográficas dos corpos de prova. As imagens foram projetadas em um monitor de vídeo e, através de um programa digital de medição, os revestimentos puderam ser medidos em diferentes ampliações. Para cada revestimento, a espessura foi avaliada ao longo de toda a seção da amostra, sendo realizadas cinco medições e anotados os valores máximos e mínimos.

### 3.2.3 COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

#### 3.2.3.1 Composições Poliméricas

Para a moldagem dos compósitos poliméricos, foram adotadas as composições, mostradas na Tabela 3.2. Os percentuais de resíduo de chumbo na forma de pó foram definidos baseados em estudos feitos por HUSSAIN *et al.* (1997) e ABDO *et al.* (2003).

**TABELA 3.2** – Formulação das misturas desenvolvidas.

| <b>NOMENCLATURA<br/>DOS<br/>COMPÓSITOS</b> | <b>RESÍDUO DE<br/>CHUMBO - RC (PÓ)<br/>(% em massa)</b> | <b>POLIÉSTER -<br/>UP<br/>(% em massa)</b> | <b>SILICONE<br/>BRANCO - SI<br/>(% em massa)</b> |
|--|---|--|--|
| UP-RC5                                     | 5   | 95   |  |
| UP-RC10                                    | 10  | 90   |  |
| UP-RC20                                    | 20  | 80   |  |
| UP-RC40                                    | 40  | 60   |  |
| SI-RC5                                     | 5   |  | 95   |
| SI-RC10                                    | 10  |  | 90   |
| SI-RC20                                    | 20  |  | 80   |
| SI-RC40                                    | 40  |  | 60   |

### 3.2.3.2 Revestimentos Metálicos

Chapas de aço ABNT 1020 foram utilizadas como substrato para deposição do resíduo de chumbo na forma de pó, por meio do processo de aspersão térmica.

## 3.3 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

O processamento dos compósitos se deu em duas etapas. A primeira diz respeito à moldagem dos corpos de prova e à determinação das características iniciais quanto à densidade, comportamento atenuante e algumas características mecânicas. A segunda etapa refere-se à moldagem dos corpos de prova, seguindo as recomendações normativas, após a seleção dos melhores materiais obtidos na primeira etapa.

### 3.3.1 COMPÓSITOS – MOLDAGEM INICIAL

#### 3.3.1.1 Moldagem das Placas de Silicone e Poliéster

A composição da borracha de silicone com resíduo de chumbo em pó, bem como do poliéster, foi efetuada de maneira manual, misturando-se o polímero com o monômero e acrescentando o resíduo de chumbo em pó. O tempo de mistura foi de 1min (polímero + monômero) e mais 1min para a formulação com todos os componentes.

Após a mistura, a composição foi vazada em um molde de isopor para a borracha de silicone e de madeira para o poliéster, sob a forma de uma solução viscosa, deixando secar à temperatura ambiente até a placa tornar-se rígida.

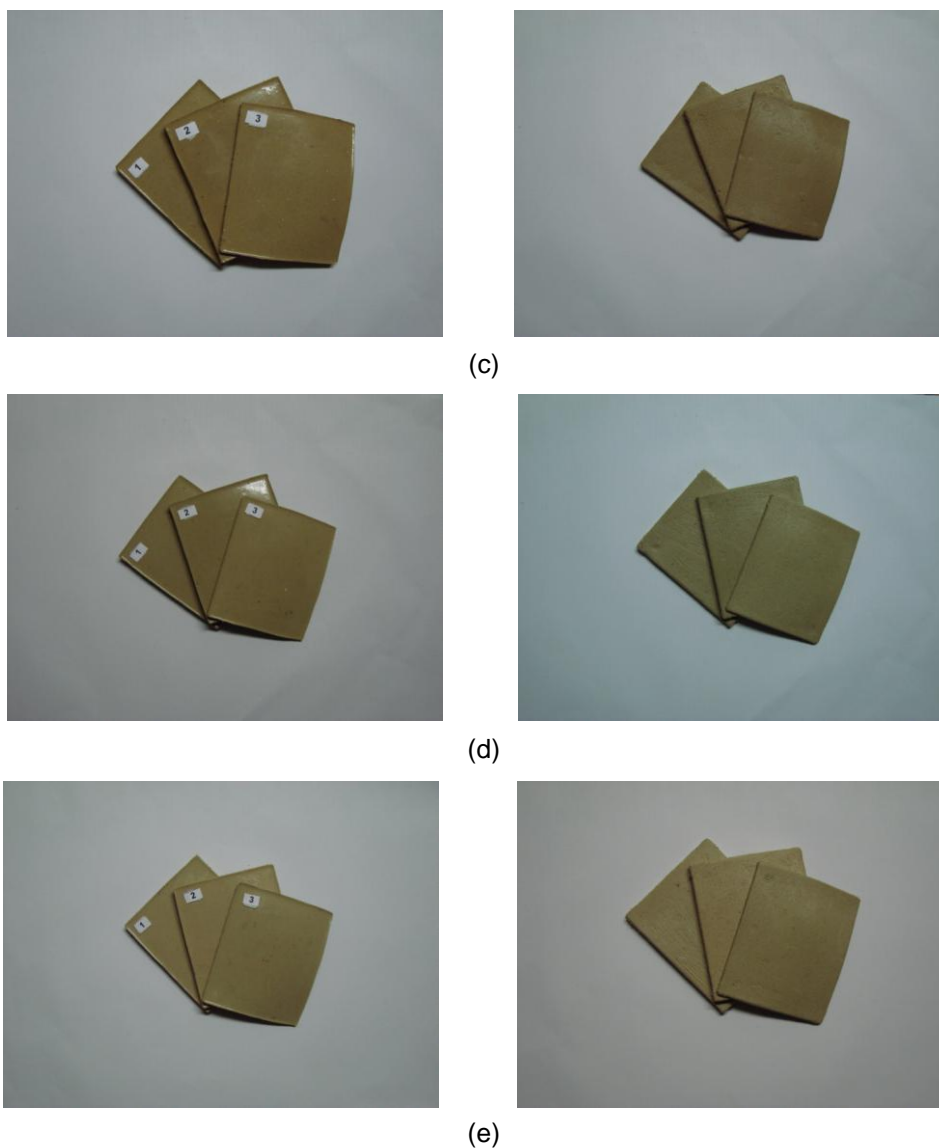
Além das placas com espessuras previamente determinadas por meio das densidades dos materiais componentes da mistura (2 placas de 6mm e uma placa de 3 mm, aproximadamente), também foram moldados corpos de provas prismáticos para a determinação da densidade da composição. As placas poliméricas são mostradas nas Figuras 3.3 e 3.4.



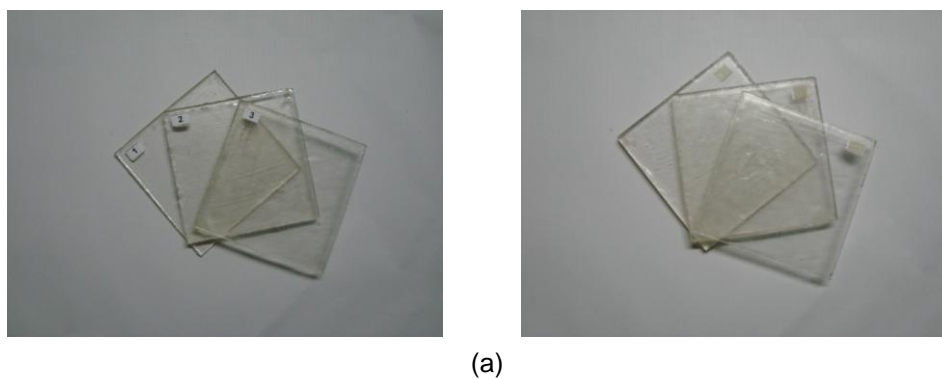
(a)

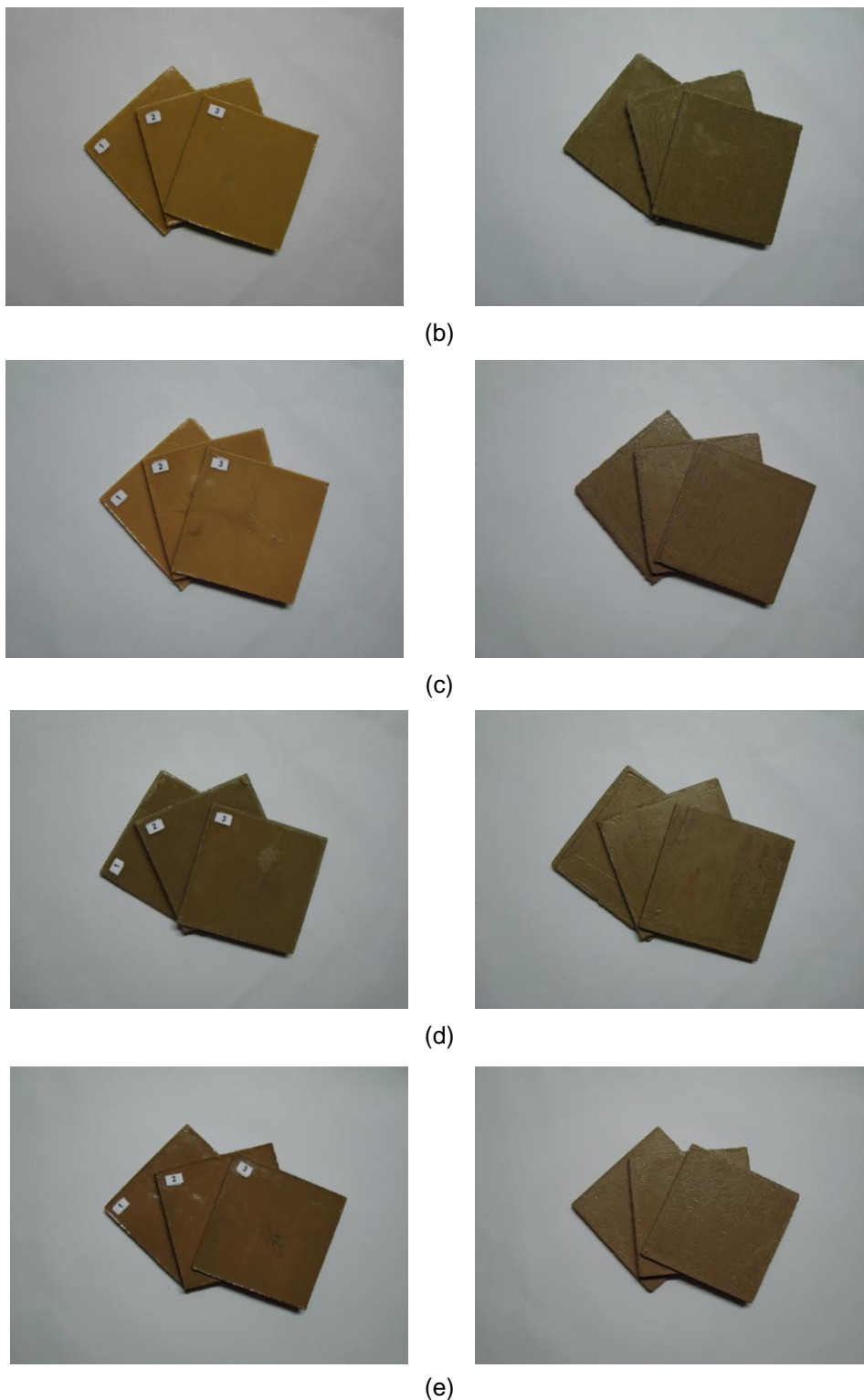


(b)



**FIGURA 3.3** – Compósitos poliméricos (placas de silicone branco + resíduo de chumbo (pó)). (a) SI sem resíduo de chumbo – referência. (b) SI – RC5. (c) SI – RC10. (d) SI – RC20. (e) SI – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa.





**FIGURA 3.4** – Compósitos poliméricos (placas de poliéster + resíduo de chumbo (pó)). (a) UP sem resíduo de chumbo – referência. (b) UP – RC5. (c) UP – RC10. (d) UP – RC20. (e) UP – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa.

### 3.3.1.2 Densidade das Composições Poliméricas

A densidade (pode-se considerar como massa específica) de um compósito pode ser determinada teoricamente ou, então, obtida experimentalmente. A massa específica teórica de um compósito foi calculada com base nas frações em massa do resíduo e da matriz polimérica contidas no compósito, desconsiderando-se os vazios, de acordo com a equação 3.3 (KAW, 1997). Foi calculada a massa específica dos compósitos poliméricos na temperatura ambiente.

$$\frac{100}{\rho_{ct}} = \frac{m_r}{\rho_r} + \frac{m_p}{\rho_p} \quad (3.3)$$

onde

$\rho_{ct}$  – massa específica do compósito, em g/cm<sup>3</sup>;

$m_r$  ,  $m_p$  – fração em massa do resíduo e da matriz polimérica contidas no compósito, em %;

$\rho_r$  e  $\rho_p$  – massa específica do resíduo e da matriz polimérica, em g/cm<sup>3</sup>.

A densidade experimental do compósito foi calculada a partir da moldagem de corpos de prova prismáticos. Estes corpos de prova foram pesados em balança de precisão, marca PRECISION PR 1000NW e medidos por meio de paquímetro, marca VERNIER CALIPER. A densidade D (g/cm<sup>3</sup>) foi calculada empregando a Equação 3.1. A densidade teórica dos compósitos foi calculada a partir da Equação 3.2.

#### 3.3.1.2.1 Volume de Vazios nos Compósitos Poliméricos

Conhecendo-se a massa específica (densidade) teórica e experimental do compósito, pode-se calcular a fração volumétrica de vazios, de acordo com a Equação 3.4 (KAW, 1997).

$$v_{vt} = \frac{\rho_{ct} - \rho_c}{\rho_{ct}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

onde

$v_{vt}$  – fração volumétrica teórica de vazios, em %;

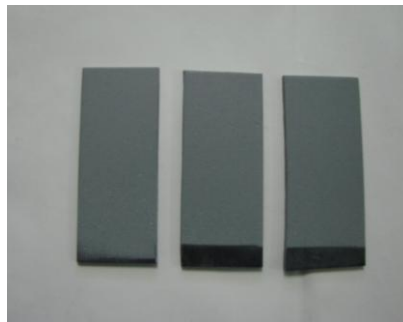
$\rho_{ct}$  – massa específica teórica do compósito, em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_c$  – massa específica aparente ou experimental do compósito, em g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.2 REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA – INICIAL

#### 3.3.2.1 Preparo dos Corpos de Prova

Foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM 1020 como substratos para serem posteriormente revestidas com pó de chumbo (resíduo proveniente de sucata de bateria). Um jateamento foi efetuado usando-se óxido de alumínio como abrasivo, para realizar a limpeza da superfície dos vários corpos de prova. A Figura 3.5 mostra os corpos de prova jateados, para serem aspergidos posteriormente.



**FIGURA 3.5** – Corpos de prova jateados.

Nesta etapa não houve a preocupação da medição da rugosidade, pois o que se esperava saber era se o resíduo de chumbo ficaria aderido ou não ao substrato.

A Figura 3.6 mostra o equipamento de jato de pressão e a cabine de jateamento utilizado no trabalho. O jateamento foi efetuado dentro da cabine hermeticamente fechada, para evitar perdas e contaminação do abrasivo.





**FIGURA 3.6** – Cabine de jateamento e equipamento de jato de pressão – Laboratório de Aspersão Térmica – UFPR.

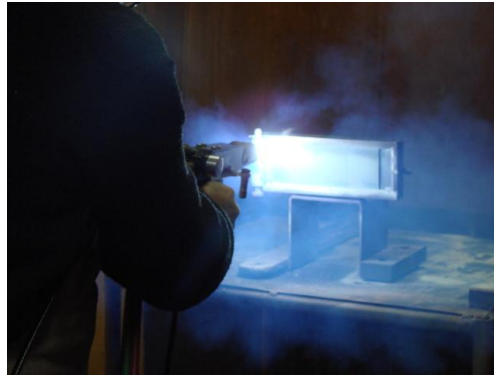
### 3.3.2.2 Processo de Aspersão Térmica

Para a deposição dos revestimentos, foi utilizada uma pistola de aspersão à chama (FS) da marca SULZER METCO, modelo 6P-II – Thermospray Gun (Figura 3.7), instalada no Laboratório de Aspersão Térmica da UFPR. Os parâmetros do processo estão relacionados na Tabela 3.3.

**TABELA 3.3** - Parâmetros para Aspersão Térmica (inicial).

| PARÂMETRO                          | PRESSÃO (PSI) | UNIDADE DE MEDIDA (mm) |
|------------------------------------|---------------|------------------------|
| Ar comprimido                      | 40            |                        |
| Oxigênio                           | 40            |                        |
| Acetileno                          | 50            |                        |
| Distância pistola – corpo de prova |               | 120                    |
| Diâmetro médio do pó               |               | 0,063                  |

A deposição do metal foi executada respeitando-se um máximo de duas horas após a operação de jateamento para evitar a oxidação da superfície. A Figura 3.7 mostra a aplicação de pó de chumbo (resíduo) nos substratos, por aspersão térmica.



**FIGURA 3.7** – Deposição do resíduo de chumbo na forma de pó em substrato metálico – Laboratório de Aspersão Térmica – UFPR.

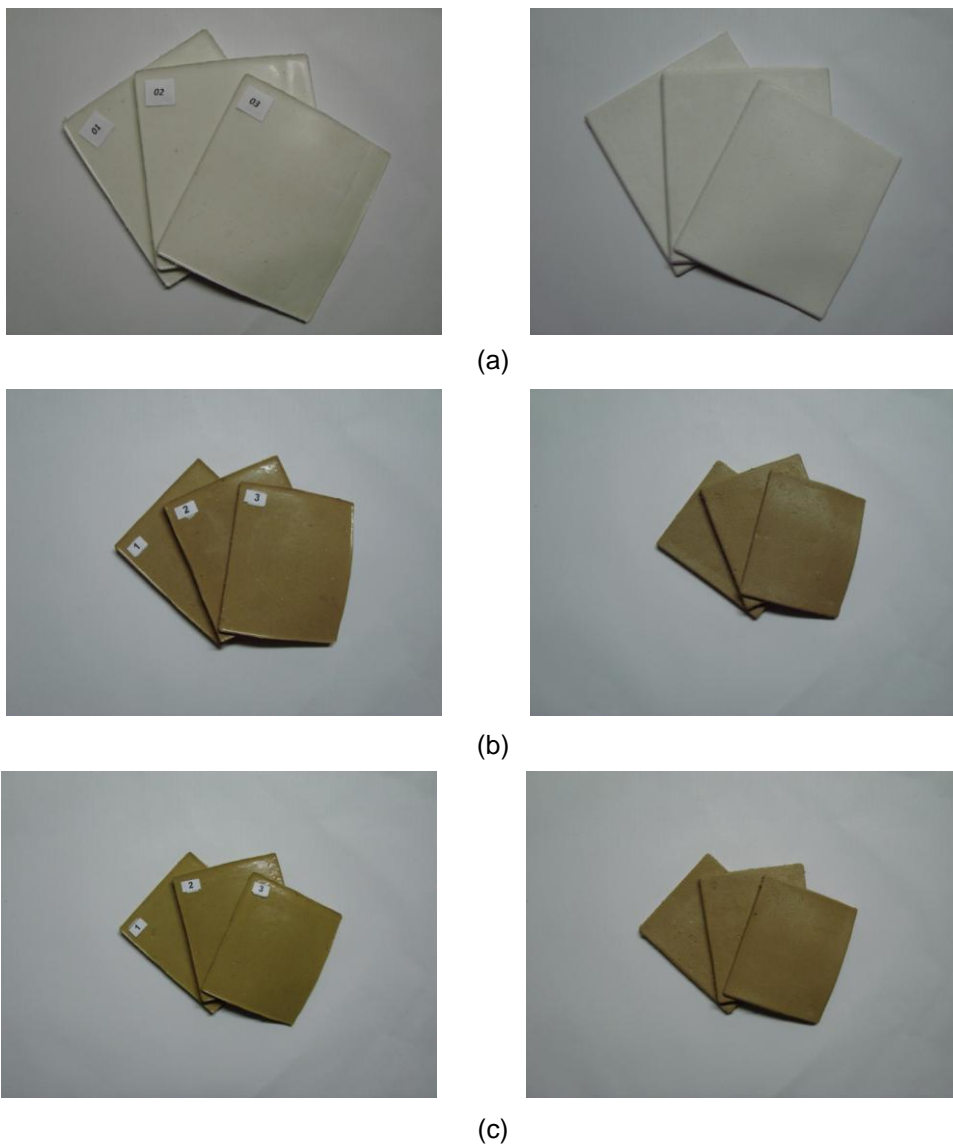
### 3.3.3 COMPÓSITOS – MOLDAGEM FINAL

Após a caracterização quanto à propriedade de atenuação dos compósitos ensaiados, foram aprimoradas as técnicas de moldagem dos corpos de prova. Para os compósitos poliméricos foram selecionados os que possuíam 20 % e 40 % de resíduo de chumbo em pó e quanto ao revestimento do resíduo de chumbo na forma de pó, ficou comprovada a eficiência do processo de deposição por aspersão térmica.

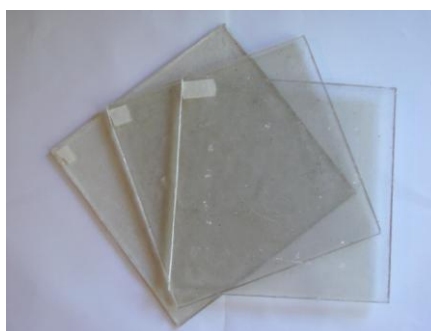
Para os dois tipos de materiais, foram seguidas as recomendações da norma NBR IEC61331-1 para medições considerando feixe estreito. Para se obter valores de referência, foram preparados corpos de prova com lâminas de chumbo sólido e aço carbono A1020.

Foram confeccionadas placas poliméricas com dimensões de 200 mm x 200 mm, com espessura variável para os compósitos feitos com poliéster e aproveitados os corpos de prova de silicone branco, corpos de prova enquadrados nas recomendações da norma. No caso de medições no feixe estreito, o corpo de prova deve ter dimensões com pelo menos 100 mm x 100 mm, condição esta atendida pela geometria da placa.

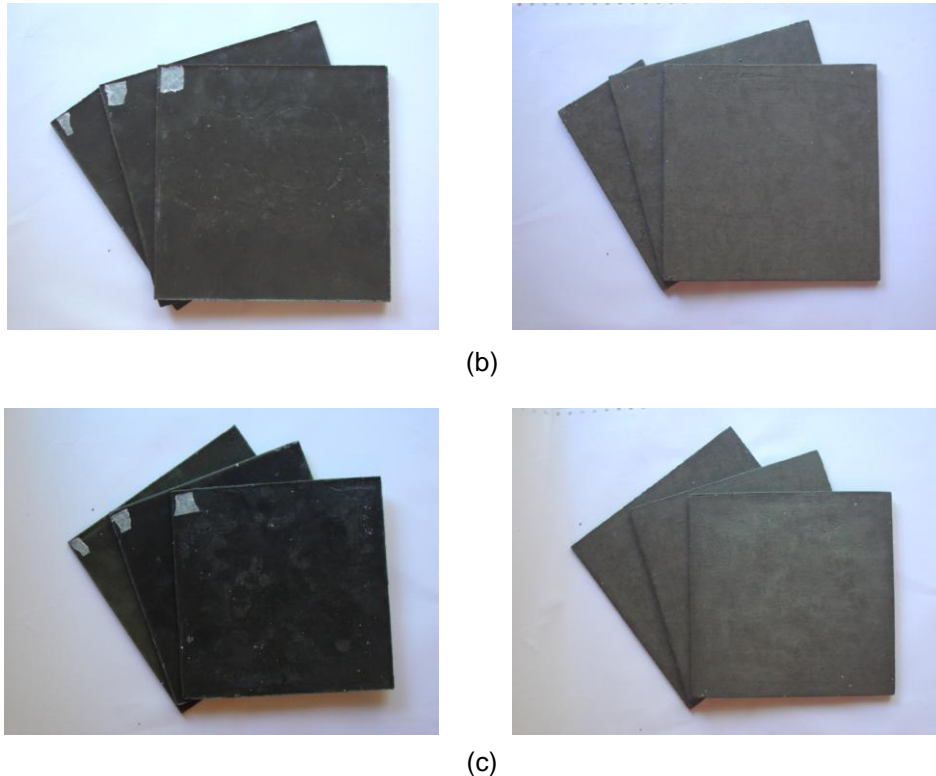
A moldagem foi feita seguindo os procedimentos descritos no item 3.3.1.1 para as composições com 20 % e 40 % de resíduo de chumbo na forma de pó. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram as diversas placas dos compósitos selecionados.



**FIGURA 3.8** – Placas poliméricas. (a) SI sem resíduo de chumbo – referência. (b) SI – RC20. (c) SI – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa.



(a)



**FIGURA 3.9** – Placas poliméricas. (a) UP sem resíduo de chumbo – referência. (b) UP – RC20. (c) UP – RC40. A figura da esquerda mostra a face superior e a figura da direita mostra a face inferior da placa.

#### 3.3.4 REVESTIMENTOS APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA – **FINAL**

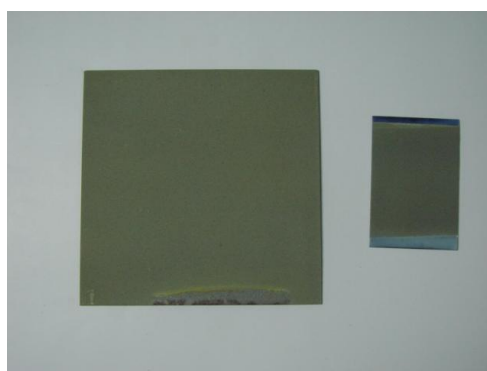
Para a confecção dos corpos de prova obtidos pelo processo de aspersão térmica, foram seguidas as recomendações da norma NBR IEC61331-1 no que se refere a foco estreito.

Foram confeccionadas placas com dimensões de 130 mm x 130 mm, com espessura de aspersão de resíduo de chumbo variável (cinco espessuras diferentes de resíduo depositados em substratos de mesma espessura). Estas dimensões foram adotadas, pois, segundo a norma, para feixe estreito, o corpo de prova deve ter dimensões com pelo menos 100 mm x 100 mm.

O processo de deposição do revestimento foi feito seguindo os procedimentos descritos no item 3.3.2.2. A Figura 3.10 mostra um revestimento metálico. Os parâmetros usados no processo estão relacionados na Tabela 3.4.

**TABELA 3.4** - Parâmetros para Aspersão Térmica (final).

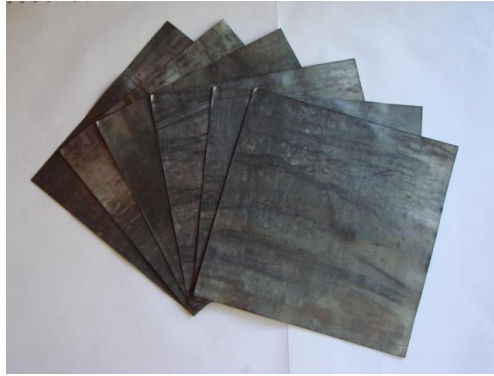
| PARÂMETRO                          | PRESSÃO (PSI) | UNIDADE DE MEDIDA (mm) |
|------------------------------------|---------------|------------------------|
| Ar comprimido                      | 50            |                        |
| Oxigênio                           | 50            |                        |
| Acetileno                          | 50            |                        |
| Distância pistola – corpo de prova |               | 120                    |
| Diâmetro do pó                     |               | 0,063                  |



**FIGURA 3.10** – Revestimento metálico – faces aspergidas. (a) Placa de aço carbono revestida com resíduo de chumbo na forma de pó – 130 x 130 mm (placa utilizada para irradiação). (b) Placa de aço carbono revestida com resíduo de chumbo usada para o ensaio de dobramento.

### 3.3.5 CORPOS DE PROVA DE CHUMBO SÓLIDO

A partir de uma lâmina de chumbo sólido de espessura igual a 0,6 mm, foram cortados cinco corpos de prova de tamanho 20 cm x 20 cm para servirem de material de referência nos ensaios de atenuação de radiação X (imagens radiográficas) e gama. Da mesma lâmina, foram cortados os corpos de prova para a caracterização mineralógica e química. Para os ensaios de caracterização final quanto à atenuação por raios X, de acordo com a norma NBR IEC61331-1, foram utilizadas placas de chumbo sólido com espessuras de 0,123 mm (padrão). A Figura 3.11 mostra as placas de chumbo sólido usadas na etapa inicial e final.



**FIGURA 3.11** – Placas de chumbo sólido. Todas com espessura de 0,6 mm.

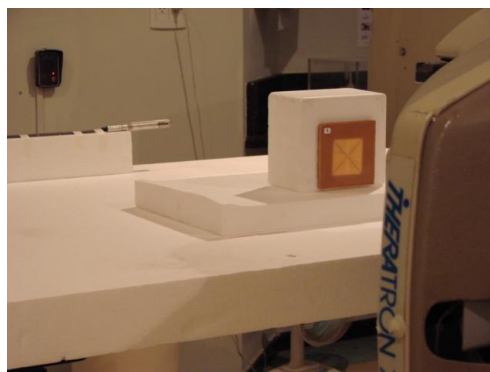
### 3.4 MEDIDAS INICIAIS DE ATENUAÇÃO

Para fazer a classificação dos melhores compósitos, foram feitas avaliações em materiais expostos à radiação gama e radiação x (imagens radiográficas).

#### 3.4.1 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA

Para avaliar as propriedades iniciais de atenuação, optou-se por expor os corpos de prova à radiação gama.

Os ensaios de atenuação da radiação gama nos compósitos propostos foram executados no Hospital Erasto Gaetner – Setor de Radioterapia. O arranjo experimental está mostrado na Figura 3.12.



**FIGURA 3.12** – Arranjo experimental montado no setor de radioterapia – Hospital Erasto Gaetner para o levantamento dos dados de atenuação, resultantes das medições para as diversas composições de várias espessuras.

O equipamento utilizado nesta pesquisa foi o THERATRON 780C, fabricado pela empresa canadense THERATRONICS INTERNATIONAL LIMITED. É uma unidade de teleterapia completa com fonte de Cobalto-60.

A fonte consiste de um radioisótopo metálico de  $^{60}\text{Co}$ , duplamente selado em cápsulas de aço inoxidável. A fonte possui geometria cilíndrica com 2 cm de diâmetro e de 1 a 3 cm de altura. Os átomos de  $^{60}\text{Co}$  decaem continuamente no isótopo Níquel-60 ( $^{60}\text{Ni}$ ) por meio da emissão de radiação gama. Este processo apresenta uma meia-vida de 5,2 anos e emite radiações gama em cascata de 1,17 e 1,33 MeV. Como as probabilidades de emissão dessas energias são iguais, para fins práticos, é comum utilizar-se do valor médio de 1,25 MeV.

O compósito (placas) foi localizado com a direção do eixo central do feixe, através do sistema de alinhamento por *lasers*, de tal forma que a distância da fonte à superfície da placa fosse de 80 cm (DFS = 80 cm). O tamanho do campo de irradiação foi ajustado para  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Escolheu-se este tamanho de campo para poder garantir a uniformidade na medição da radiação. Os colimadores foram posicionados a uma distância de 35 cm da fonte. O tempo de exposição foi de 6 s.

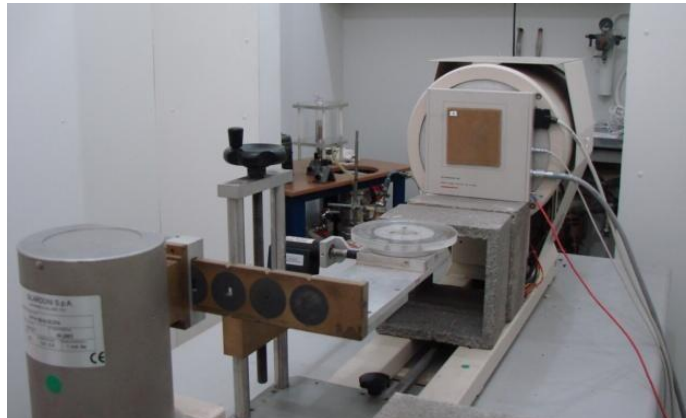
Para detectar a intensidade de radiação que passa pelas placas, foi colocada a uma distância de 1,5 m um detector tipo câmara de ionização NE TECHNOLOGY de volume interno igual a  $6\text{cm}^3$ , modelo 2505/3 SER n°2174.

### 3.4.2 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO X POR MEIO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS

Para a determinação dos coeficientes de atenuação com relação aos raios X, inicialmente foi utilizado um arranjo experimental, localizado no Laboratório para Diagnóstico de Materiais do LACTEC, cujos resultados correspondem a uma análise mais qualitativa, mesmo com respostas quantitativas. Por meio da análise das imagens radiográficas pode-se quantificar a intensidade de radiação que passa pela placa, sendo possível estabelecer uma relação do coeficiente de atenuação com a espessura do material.

### 3.4.2.1 ARRANJO EXPERIMENTAL – LACTEC

As medidas experimentais para a determinação das propriedades de atenuação da radiação X das 8 (oito) composições, foram realizadas utilizando o arranjo experimental apresentado na Figura 3.13 no LACTEC.



**FIGURA 3.13** – Arranjo experimental montado no Laboratório do LACTEC para o levantamento dos dados de atenuação.

O arranjo experimental consiste num sistema tomográfico CT2000, que permite estudar objetos de modo não-destrutivo, possibilitando a visualização de sua estrutura interna e a detecção de possíveis defeitos. Graças ao seu detector planar, o sistema pode ser utilizado tanto no modo radiografia quanto no modo tomografia (QUOIRIN, 2004 e GODOI, 2005).

O sistema é composto de um gerador de raios X e por uma placa MOS – Image Sensor for X Ray – C7942CA-02, marca HAMAMATSU. A tensão e a corrente utilizadas no tubo de raios X no SISTEMA CT2000, foram de 100 kV e 1 mA, respectivamente. A amostra foi colocada a uma distância da fonte de 90 cm.

Os resultados são obtidos pela leitura das imagens radiográficas das placas. As imagens são convertidas em pixels, representados através de valores médios de níveis de cinza, sendo o valor máximo sem atenuação de 4095 (branco). A partir dos dados de intensidade medida nas radiografias e a distância percorrida pelo feixe de raios X, podem-se obter as curvas de atenuação para os materiais em questão. Para avaliar a homogeneidade dos compósitos e revestimentos metálicos, bem como a atenuação, para cada imagem foram expressos os valores de tons de cinza na forma de perfil, em função da distância (pixels) da imagem. O valor “zero” no perfil



representa a cor preta e o valor “4095” corresponde à cor branca. Quanto mais os pontos do perfil se aproximam do “zero”, mais atenuante é o material avaliado.

### **3.5 MEDIDAS FINAIS DE ATENUAÇÃO**

#### **3.5.1 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA**

O compósito (placas) foi localizado com a direção do eixo central do feixe, através do sistema de alinhamento por *lasers*, de tal forma que a distância da fonte à superfície da placa fosse de 100 cm (DFS = 100 cm). O tamanho do campo de irradiação foi ajustado para 10 x 10 cm<sup>2</sup>. Escolheu-se este tamanho de campo para garantir a uniformidade na medição da radiação. Os colimadores foram posicionados a uma distância de 35 cm da fonte. O tempo de exposição foi de 6 s.

Para detectar a intensidade de radiação que passa pelas placas, foi colocada a uma distância de 1,3 m um detector tipo câmara de ionização NE TECHNOLOGY de volume interno igual a 6cm<sup>3</sup>, modelo 2505/3 SER n°2174.

#### **3.5.2 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO X**

Foram feitas as medidas experimentais para a determinação das propriedades de atenuação da radiação X para os melhores compósitos poliméricos e revestimentos metálicos, mantendo a geometria descrita no item 3.4.2.1.

As tensões e as correntes utilizadas no tubo de raios X para as imagens radiográficas obtidas de todas as amostras no SISTEMA CT2000 foram de 70 e 100 kV a 1 mA, respectivamente.

#### **3.5.3 AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO X - ARRANJO EXPERIMENTAL – Laboratório IEE-USP**

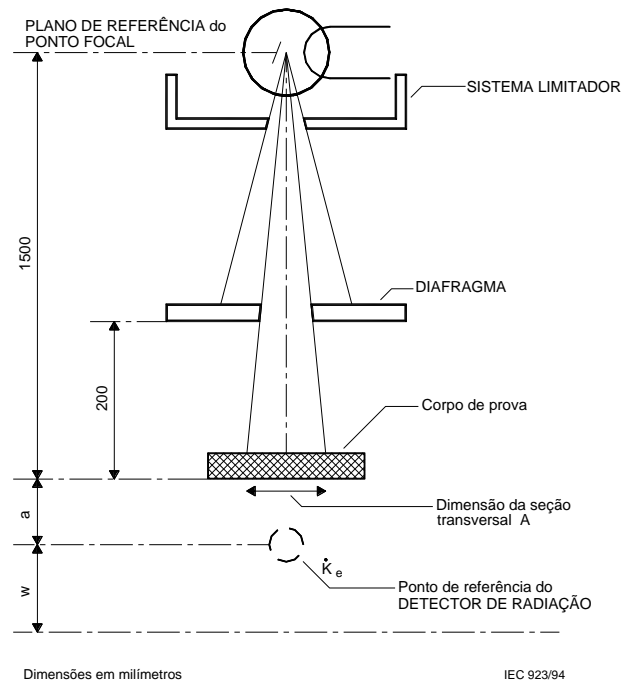
As medidas experimentais para a determinação das propriedades de atenuação da radiação X das melhores composições produzidas foram realizadas utilizando o arranjo experimental apresentado na Figura 3.14.



**FIGURA 3.14** - Arranjo experimental IEE-USP.

Os ensaios foram realizados no laboratório do IEE-USP, credenciado pelo INMETRO, de acordo com a norma ABNT NBR/IEC 61331-1, empregando um equipamento de raios X Philips MCN 323, que opera entre 15 e 320 kV, foco grosso, corrente variável para as tensões de 80 e 150 kV, com filtração adicional de 0,15 mm e 0,7 mm Cu, respectivamente, utilizando câmaras de ionização RADCAL CORPORATION de volume interno igual a 6 cm<sup>3</sup> e monitor de radiação, modelo 1515.

Foram feitos dois arranjos, sendo o primeiro composto somente por placas poliméricas com resíduo de chumbo (para a composição que havia apresentado os melhores resultados preliminares) e o segundo, por placas aspergidas com resíduo de chumbo. O material analisado foi colocado sobre o suporte metálico e posicionado entre a câmara de ionização e na direção do equipamento radiológico. Tal procedimento foi repetido variando a espessura das placas para obter as medições de atenuação. A figura 3.15 mostra esquematicamente o arranjo experimental que foi adotado para a medição dos fatores de atenuação.



**FIGURA 3.15** – Arranjo experimental utilizado para as medições dos fatores de atenuação dos compósitos e revestimentos metálicos. ( $a = 4000$  mm e  $w = 500$  mm).

Foram realizadas medições nos corpos de prova para verificar a determinação e a indicação de suas propriedades de atenuação, utilizando os equipamentos e instrumentos descritos na Tabela 3.5, com as características 80 kV - 40 mA - 0,15 mm Cu e 150 kV - 24 mA - 0,7 mm Cu, em conformidade com os métodos descritos pela norma ABNT NBR IEC 61331-1: 2004 - Dispositivos de proteção contra radiação X para fins de diagnóstico médico - Parte 1: Determinação das propriedades de atenuação de materiais. As medidas foram feitas na temperatura de 23,8°C e com 35% de umidade relativa do ar, uma vez que estas condições interferem nas leituras de atenuação.

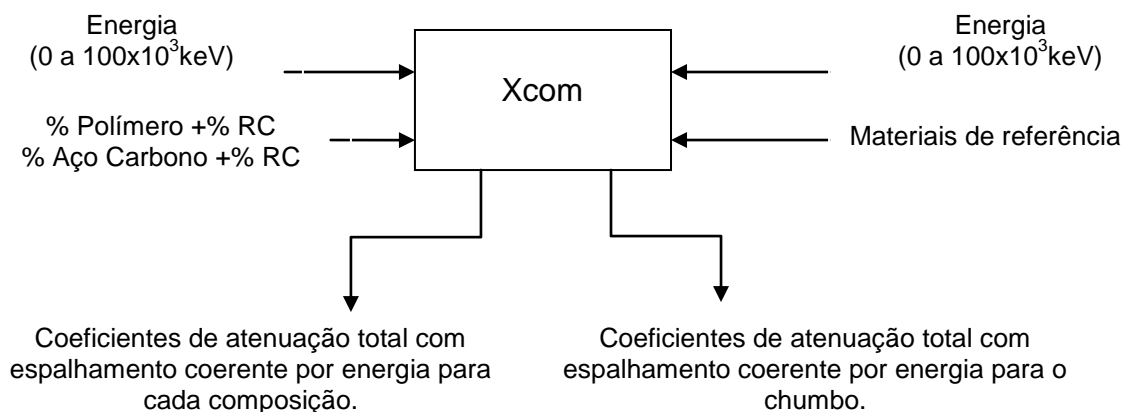
**TABELA 3.5** – Instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio.

| EQUIPAMENTO            | FABRICANTE | MODELO  |
|------------------------|------------|---------|
| Régua de precisão      | Stanley    | -----   |
| Filtros de Cobre       | -----      | -----   |
| Absorvedores de Chumbo | -----      | -----   |
| Monitor de radiação    | Radcal     | 1515    |
| Câmara de ionização    | Radcal     | 6 cc    |
| Tubo de raios X        | Philips    | MCN 323 |
| Gerador                | Philips    | MG 325  |
| Comando                | Philips    | MGC 40  |

A metodologia para a avaliação dos compósitos produzidos para serem utilizados como blindagem em salas de radiologia diagnóstica seguiu as recomendações da norma ABNT NBR IEC 61331-1: 2004 - Dispositivos de proteção contra radiação X para fins de diagnóstico médico - Parte 1: Determinação das propriedades de atenuação de materiais. Os resultados foram expressos em mm Pb, ou seja, em termos de espessura equivalente de chumbo.

### 3.6 FLUXOGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DA ATENUAÇÃO – Simulação Computacional

Utilizando-se o Programa Xcom, foram simulados os coeficientes de atenuação das composições formuladas, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.16. Este procedimento segue a mesma metodologia do trabalho desenvolvido por FRIMAIO (2006).



**FIGURA 3.16** – Fluxograma da utilização do Programa Xcom para os compósitos selecionados e os materiais de referência.

Com os dados das composições químicas de cada compósito, revestimentos metálicos e materiais de referência, foram construídas curvas de atenuação, no intervalo de energia estimado a cada 0,01 keV.

### 3.7 OBTENÇÃO DOS EXTRATOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO

Inicialmente, os corpos de prova poliméricos com resíduo de chumbo em pó foram triturados para passar em peneira de malha quadrada de 9,5 mm. Seguindo as recomendações das normas, os extratos foram preparados no LTA – Laboratório de Tecnologia Ambiental e colocados em recipientes para serem posteriormente analisados no CEPPA – Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos.

A leitura dos parâmetros físicos e químicos referentes ao resíduo de chumbo em pó presente nos extratos foram feitos no espectrofotômetro de absorção atômica. Os valores obtidos foram comparados com as recomendações do anexo F e G da norma NBR ABNT 10004/2004 – Caracterização e classificação de resíduos sólidos.



## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

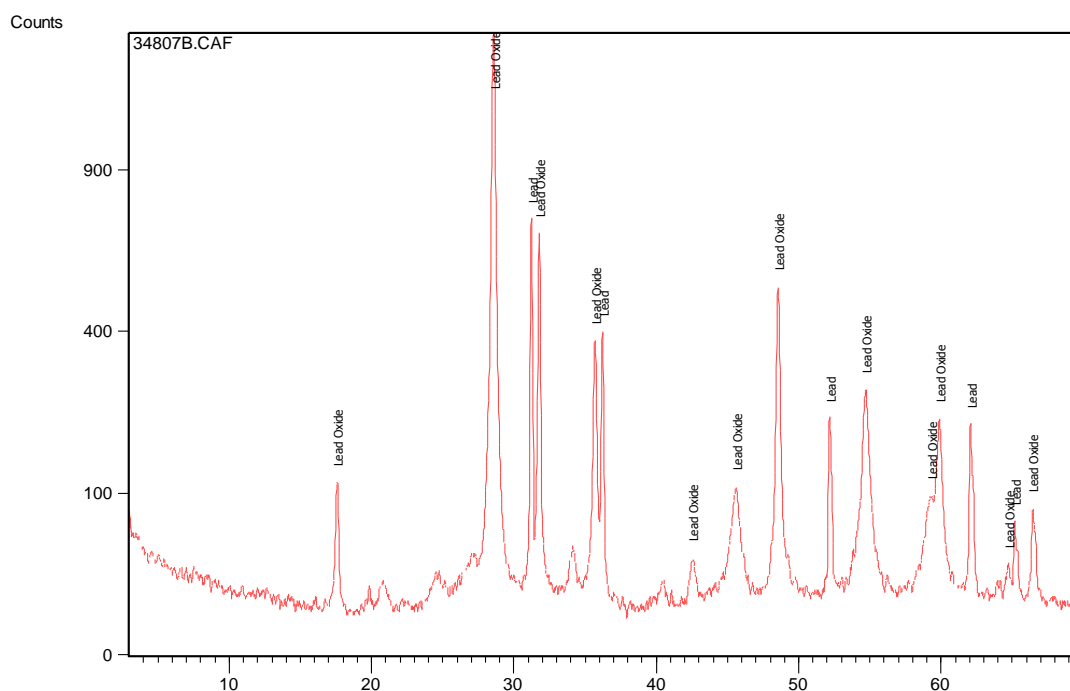
A proposta da presente pesquisa é verificar o comportamento da utilização de resíduo de chumbo na forma de pó em compósitos poliméricos por meio de mistura manual e revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica, quanto às suas propriedades de atenuação, quando aplicados em instalações radiológicas. Assim, são apresentados os seguintes resultados:

- ✓ Caracterizações do resíduo de chumbo.
- ✓ Valores experimentais das densidades dos materiais isolados e das composições poliméricas.
- ✓ Análise química obtida através da fluorescência de raios X.
- ✓ Análise química obtida por energia dispersiva de raios X.
- ✓ Caracterização dos compósitos poliméricos por meio da análise térmica.
- ✓ Caracterização dos compósitos poliméricos e revestimentos metálicos por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura.
- ✓ Caracterização morfológica dos revestimentos metálicos por meio da técnica de microscopia ótica.
- ✓ Determinação das propriedades mecânicas dos revestimentos metálicos.
- ✓ Apresentação das curvas e fatores de atenuação inicial e final dos compósitos poliméricos e revestimentos metálicos.
- ✓ Avaliação da homogeneidade dos compósitos poliméricos e revestimentos metálicos a partir da visualização de imagens obtidas por raios X.
- ✓ Simulação computacional para obtenção de curvas de atenuação em função da energia.
- ✓ Avaliação do impacto ambiental dos compósitos poliméricos expostos ao meio ambiente.

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CHUMBO – INICIAL

### 4.1.1 ANÁLISE MINERALÓGICA

O difratograma do resíduo de chumbo, com os principais picos resultantes na análise da amostra, obtido com os padrões ICDD (*International Center for Diffraction Data*) estão apresentados na Figura 4.1.



| Código de Referência | Nome do Componente | Fórmula Química |
|----------------------|--------------------|-----------------|
| 78-1666              | Óxido de chumbo    | Pb O            |
| 65-2873              | Chumbo             | Pb              |

**FIGURA 4.1** – Difratograma do resíduo de chumbo.

Na avaliação do difratograma, percebe-se somente a presença de picos de chumbo. Como o material oxida facilmente na presença de oxigênio, não se pode mensurar a quantidade exata de óxido de chumbo e de chumbo metálico presente na amostra, através do difratograma da Figura 4.1. Estes resultados são avaliados com mais precisão na técnica de calorimetria, mostrada na seção 4.5.



## 4.1.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O resultado da análise e a curva granulométrica do resíduo de chumbo (pó), obtidos pela atomização de resíduos de chumbo de baterias automotivas, estão apresentados na Figura 4.2.

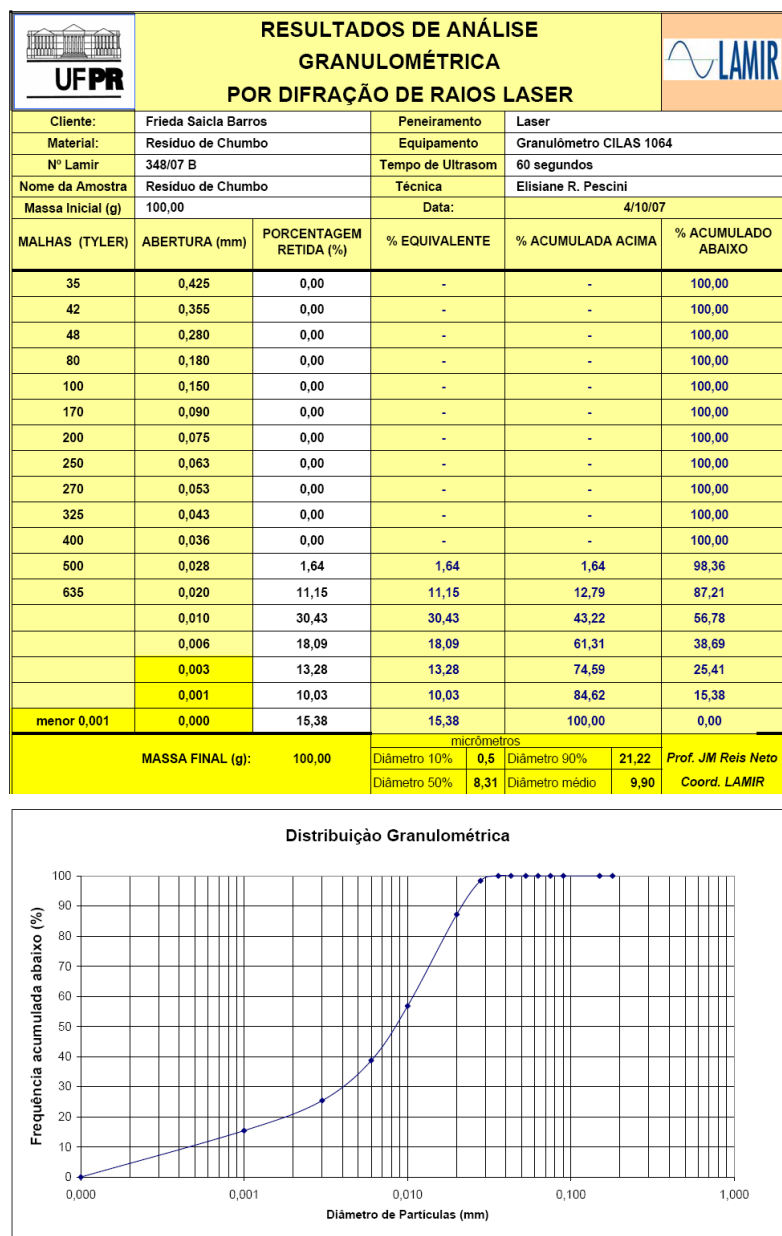
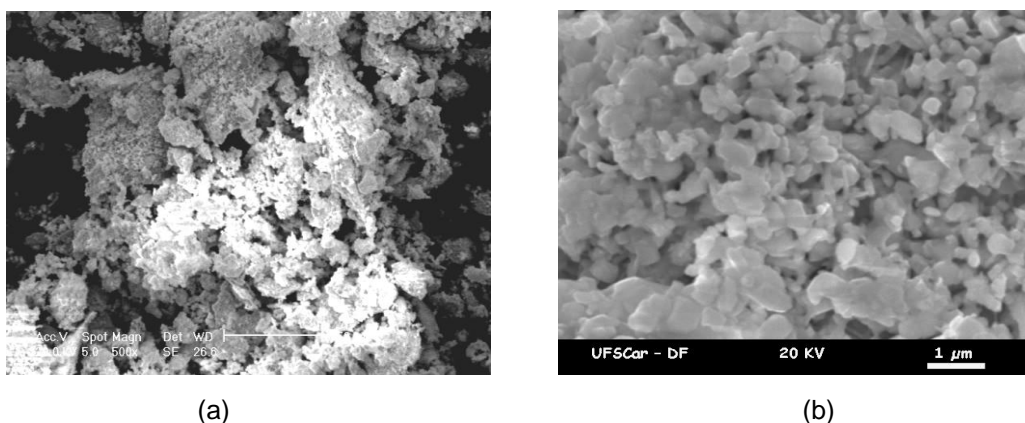


FIGURA 4.2 – Composição e curva granulométrica do resíduo de chumbo (pó).

Pela avaliação da análise granulométrica, obteve-se uma distribuição uniforme com predominância de 50% referente ao diâmetro das partículas, correspondente a  $8,31\mu\text{m}$  e diâmetro médio igual a  $9,90\mu\text{m}$ .

#### 4.1.3 AVALIAÇÃO MORFOLÓGICA DO PÓ POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A Figura 4.3 mostra a morfologia do pó de chumbo (resíduo). Pelas fotomicrografias, pode-se perceber que se trata de um pó bastante fino, com granulometria variada, o que facilita a aglomeração dos grãos.



**FIGURA 4.3** – Fotomicrografia do resíduo de chumbo em forma de pó. (a) Aumento de 500X. (b) Aumento de 16.000X.

## 4.2 DENSIDADES DOS MATERIAIS ISOLADOS, DAS COMPOSIÇÕES POLIMÉRICAS E TEOR DE VAZIOS

Os valores obtidos para a densidade dos materiais isolados estão apresentados na Tabela 4.1 e os valores das densidades experimentais, densidades teóricas e fração volumétrica de vazios dos compósitos poliméricos estão apresentadas na Tabela 4.2.

**TABELA 4.1** – Densidade experimental dos materiais.

| MATERIAIS               | DENSIDADE EXPERIMENTAL<br>$\rho_e$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|---|
| RESÍDUO DE CHUMBO (PÓ)  | 9,72 ± 0,05   |
| SILICONE BRANCO N-2     | 1,229 ± 0,016   |
| POLIÉSTER RPF-AZ 1.0#11 | 1,163 ± 0,015   |

**TABELA 4.2** – Densidade teórica e experimental dos compósitos.

| COMPOSIÇÃO | MATERIAIS | DENSIDADE EXPERIMENTAL<br>$\rho_e$ (g/cm <sup>3</sup> ) | DENSIDADE TEÓRICA<br>$\rho_{ct}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | FRAÇÃO VOL. TEOR. DE VAZIOS<br>$v_{vt}$ (%) |
|------------|-----------|---|---|---|
| 1          | UP – RC5  | 1,224 ± 0,019   | 1,217   | - 0,6                                       |
| 2          | UP – RC10 | 1,290 ± 0,043   | 1,275   | - 1,2                                       |
| 3          | UP – RC20 | 1,400 ± 0,020   | 1,412   | 0,8   |
| 4          | UP – RC40 | 1,535 ± 0,046   | 1,795   | 14,5  |
| 5          | SI – RC5  | 1,362 ± 0,027   | 1,285   | - 6,0                                       |
| 6          | SI – RC10 | 1,414 ± 0,024   | 1,347   | - 4,8                                       |
| 7          | SI – RC20 | 1,432 ± 0,009   | 1,489   | 3,8   |
| 8          | SI – RC40 | 1,560 ± 0,036   | 1,889   | 17,4  |

Obs.: O sinal negativo informa que a densidade experimental é menor que a densidade teórica calculada.

A densidade experimental, em 50 % das amostras, foi maior que a densidade teórica. Em razão da existência de vazios no interior do compósito, o esperado seria a diminuição da densidade experimental, o que se verifica em 50 % das amostras.

### 4.3 ANÁLISE QUÍMICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A composição química experimental dos materiais de referência, dos compósitos e dos revestimentos metálicos estão apresentadas nas Tabelas 4.3 a 4.6. As análises químicas dos compósitos serviram de dados de entrada para a

simulação computacional – programa Xcom que avalia as características de atenuação dos materiais.

**TABELA 4.3** – Composição química semiquantitativa do chumbo sólido e resíduo de chumbo (RC).

| COMPOSIÇÃO                     | QUANTIDADE (%)             |         |
|--------------------------------|----------------------------|---------|
|                                | CHUMBO SÓLIDO (REFERÊNCIA) | RC (PÓ) |
| PbO                            | 99,3                       | 100,0   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3                        | < 0,1   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,2                        | < 0,1   |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,2                        | < 0,1   |

**TABELA 4.4** – Composição química semiquantitativa da borracha de silicone (SI), SI – RC20 e SI – RC40.

| COMPOSIÇÃO                     | QUANTIDADE (%)  |           |           |
|--------------------------------|-----------------|-----------|-----------|
|                                | SI (REFERÊNCIA) | SI – RC20 | SI – RC40 |
| SiO <sub>2</sub>               | 97,8            | 94,0      | 73,4      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,8             | < 0,1     | 0,6       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,1             | 0,1       | 0,1       |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,8             | 0,1       | 0,6       |
| SO <sub>3</sub>                | 0,1             | 0,1       | 0,2       |
| CaO                            | 0,3             | < 0,1     | 0,5       |
| SnO <sub>2</sub>               | 0,1             | < 0,1     | 0,1       |
| PbO                            | -               | 5,7       | 24,3      |

**TABELA 4.5** – Composição química semiquantitativa do poliéster (UP), UP – RC20 e UP – RC40 (feita com perda ao fogo).

| COMPOSIÇÃO                     | QUANTIDADE (%)  |           |           |
|--------------------------------|-----------------|-----------|-----------|
|                                | UP (REFERÊNCIA) | UP – RC20 | UP – RC40 |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,02            | 1,2       | 1,7       |
| CO <sub>2</sub>                | 99,96           | 87,4      | 72,0      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,01            | < 0,1     | 0,1       |
| ZrO <sub>2</sub>               | -               | < 0,1     | 0,1       |
| SO <sub>3</sub>                | 0,01            | 1,0       | 0,6       |
| PbO                            | -               | 10,4      | 25,5      |

**TABELA 4.6** – Composição química semiquantitativa do aço carbono e amostras de revestimentos com resíduo de chumbo (pó).

| COMPOSIÇÃO                     | QUANTIDADE (%)           |
|--------------------------------|--------------------------|
|                                | AÇO CARBONO (REFERÊNCIA) |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 98,8                     |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,4                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,3                      |
| MnO                            | 0,3                      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,1                      |
| SO <sub>3</sub>                | 0,1                      |

| COMPOSIÇÃO | QUANTIDADE (%) |           |           |           |           |
|------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|            | AMOSTRA 1      | AMOSTRA 2 | AMOSTRA 3 | AMOSTRA 4 | AMOSTRA 5 |
| Pb         | 93,4           | 68,6      | 93,7      | 88,9      | 93,1      |
| Fe         | 5,8            | 28,9      | 5,3       | 9,3       | 6,4       |
| Al         | 0,6            | 1,3       | 0,6       | 1,0       | 0,3       |
| Si         | 0,2            | 0,8       | 0,3       | 0,4       | 0,1       |
| Mg         | < 0,1          | 0,3       | 0,1       | 0,3       | < 0,1     |
| Cr         | < 0,1          | 0,1       | < 0,1     | 0,1       | < 0,1     |
| Ni         | < 0,1          | < 0,1     | < 0,1     | < 0,1     | 0,1       |

Analizando a composição química do chumbo sólido e do resíduo de chumbo, percebe-se que ambos são praticamente iguais, visto que o resíduo de chumbo é formado por 100% de óxido de chumbo. Neste tipo de análise não se pode afirmar qual a quantidade efetiva de óxido de chumbo e chumbo puro na amostra, pois se considera os óxidos presentes no material.

Com relação aos compósitos feitos com silicone branco, devido à impossibilidade de se fazer a perda ao fogo, em função da evaporação da amostra, os resultados ficaram alterados, mantendo-se somente a proporção das concentrações dos elementos.

Considerando os compósitos com silicone branco, percebe-se uma diferença entre o material com 20% e com de 40% de RC, tendo este último um percentual maior de resíduo de chumbo (RC). Deve-se ressaltar que os valores das análises são inferiores ao pré-estabelecido. Esta diferença ocorre por se tratar de um compósito formado por um material líquido e um pó. Na sua mistura e solidificação, é muito provável que se tenha partes com proporções variadas de resíduo de chumbo.

No caso do compósito confeccionado com poliéster, foi possível fazer a perda ao fogo, resultando em uma concentração real do material.

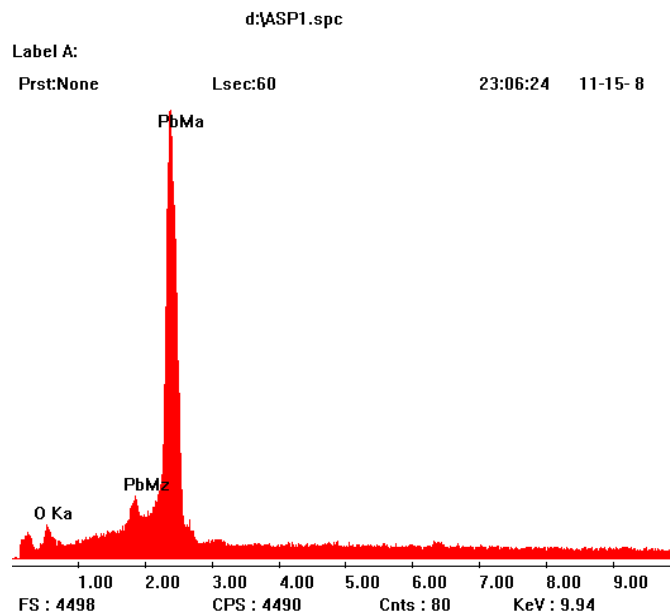
O comportamento do compósito feito com poliéster é semelhante ao compósito com silicone. Pode-se perceber a diferença para o material com 20% RC e o de 40% de RC, tendo este último um percentual maior de resíduo de chumbo (RC). Novamente, os valores das análises são inferiores ao pré-estabelecido,

podendo ser consideradas as mesmas justificativas do compósito feito com silicone branco.

A análise química dos revestimentos metálicos mostra os teores de resíduo de chumbo associado aos outros elementos que formam a liga de aço carbono. Os valores obtidos podem variar, uma vez que a espessura dos revestimentos aspergidos com resíduo de chumbo é variável.

#### 4.4 ANÁLISE QUÍMICA POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDS)

A análise química por EDS foi feita somente para os revestimentos metálicos, uma vez que esta técnica não apresentou bons resultados para a interpretação dos compósitos poliméricos. Os valores percentuais da composição química estão apresentados na Tabela 4.7, bem como um difratograma típico dos revestimentos metálicos, na Figura 4.4.



**FIGURA 4.4** – Difratograma do aço carbono aspergido com RC (na forma de pó).

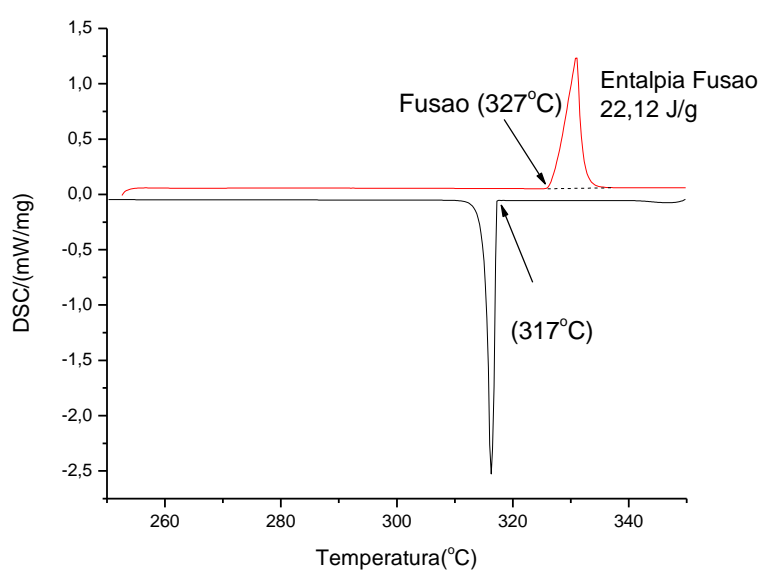
**TABELA 4.7** – Composição química das amostras de revestimentos com resíduo de chumbo (pó).

| COMPOSIÇÃO | QUANTIDADE (%) |           |           |           |           |
|------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|            | AMOSTRA 1      | AMOSTRA 2 | AMOSTRA 3 | AMOSTRA 4 | AMOSTRA 5 |
| PbM        | 94,5           | 91,8      | 93,2      | 92,4      | 92,8      |
| OK         | 5,5            | 8,2       | 6,8       | 7,6       | 7,2       |

Em todas as amostras dos revestimentos metálicos foi detectada somente a presença do chumbo em pó e de oxigênio. Estes resultados correspondem somente à análise da superfície dos compósitos (revestimento), onde se percebe a presença do resíduo de chumbo na forma de pó metálico e oxidado.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÕES DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS POR MEIO DA TÉCNICA DE ANÁLISE TÉRMICA

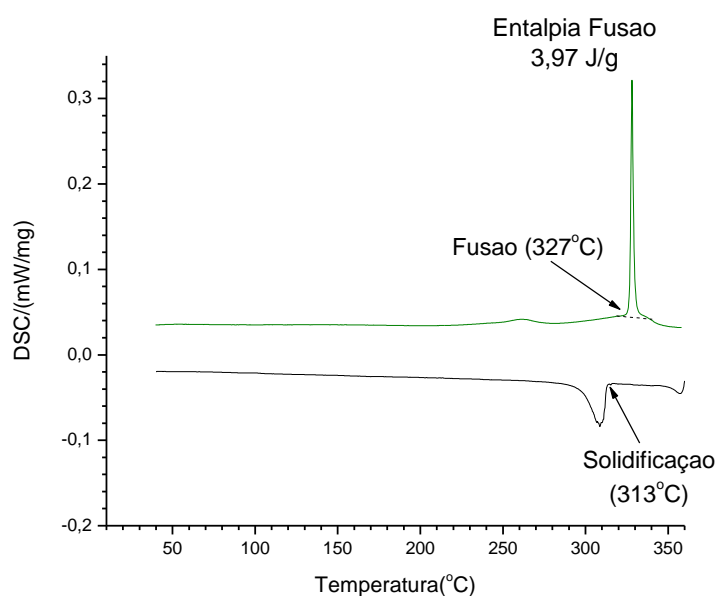
Inicialmente, foram analisados o resíduo de chumbo (pó) e os materiais de referência. A Figura 4.5 mostra a caracterização do chumbo sólido e a Figura 4.6 refere-se ao resíduo de chumbo (pó).

**FIGURA 4.5** – Curva de DSC do chumbo sólido (taxa de aquecimento de 10 °C /min, atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) e fluxo de 20 ml/min).



A entalpia de fusão do chumbo metálico é de 23,16 J/g (ICZ, 2008), indicando que o material identificado como chumbo sólido apresenta 95,52 % em massa de chumbo metálico, enquanto que o resíduo de chumbo em pó apresenta um percentual 17,13 % em massa de chumbo metálico, confirmando assim que, por fluorescência de raios X e por EDS, somente foi detectado chumbo metálico e óxido de chumbo.

A temperatura de fusão característica do chumbo metálico é de 327 °C (ICZ, 2008), sendo este valor de referência encontrado em ambas as curvas. A temperatura de solidificação para o chumbo sólido corresponde a 317 °C e para o resíduo de chumbo 313 °C.

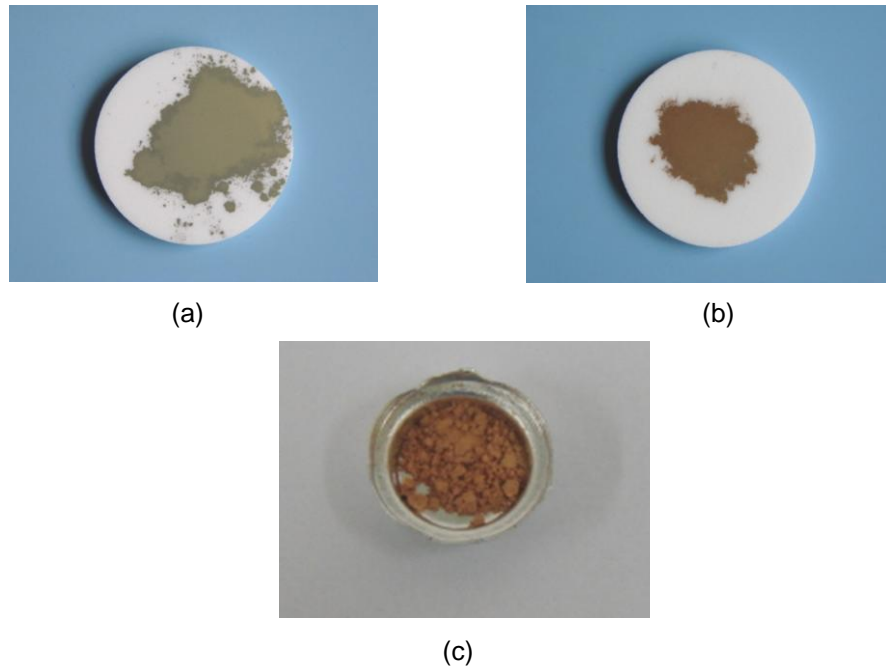


**FIGURA 4.6** – Curva de DSC do resíduo de chumbo (pó) - (taxa de aquecimento de 10 °C /min, atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) e fluxo de 20 ml/min).

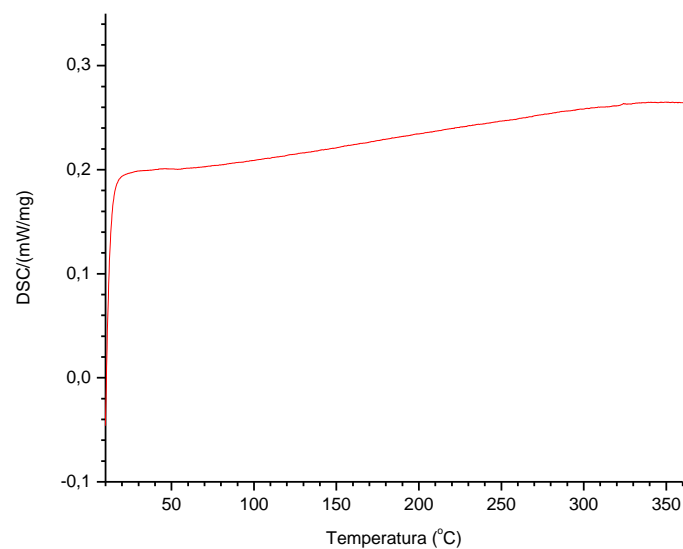
A curva de DSC no intervalo da temperatura ambiente até 360 °C, referente ao resíduo de chumbo (pó), conforme Figura 4.6, mostra um comportamento monótono, indicando que a amostra não apresenta umidade e indícios de contaminação.

As amostras de resíduo de chumbo, logo após sua obtenção, apresentam cor cinza esverdeada pela maior presença de chumbo metálico. Após contato com o ar, sua coloração passa a um amarelo ocre, característica do óxido de chumbo.

Após a calorimetria, a cor amarelo se intensifica e os grãos sofrem uma aglutinação semelhante à sinterização. Estes detalhes são mostrados na Figura 4.7.



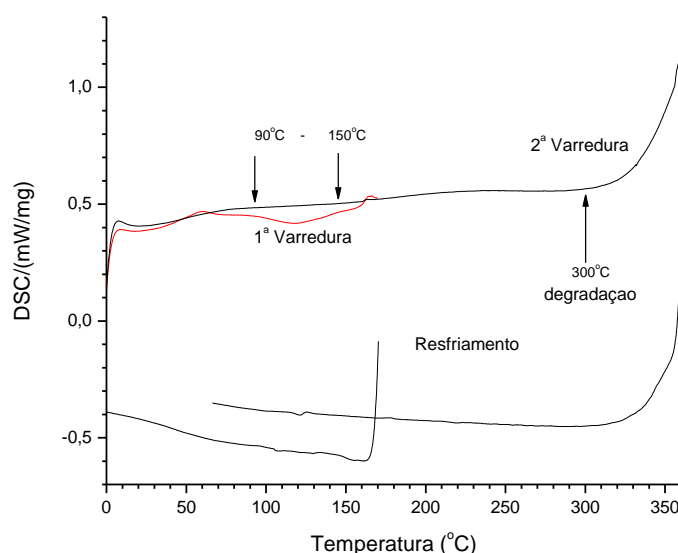
**FIGURA 4.7** – Amostra de resíduo de chumbo (RC). (a) Não oxidada. (b) Oxidada, ambas antes do DSC. (c) Amostra após o DSC.



**FIGURA 4.8** – Curva de DSC do silicone branco (SI) - (taxa de aquecimento de 10 °C/min, atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) e fluxo de 20 ml/min).

Pode-se perceber na curva de DSC, apresentada na Figura 4.8, referente ao silicone branco, um comportamento monótono no intervalo de temperatura avaliado, temperatura ambiente a 360 °C, com capacidade calorífica crescente com a temperatura. O silicone é um elastômero de alta resistência térmica, indicado para temperatura de trabalho de até 400 °C.

Na Figura 4.9 são representadas as curvas de DSC do poliéster puro. Estas curvas foram obtidas no intervalo de temperatura de 0 a 360 °C, realizadas em duas etapas: a primeira, no intervalo de temperatura de 0 a 170 °C e a segunda, no intervalo de temperatura de 0 a 360 °C.



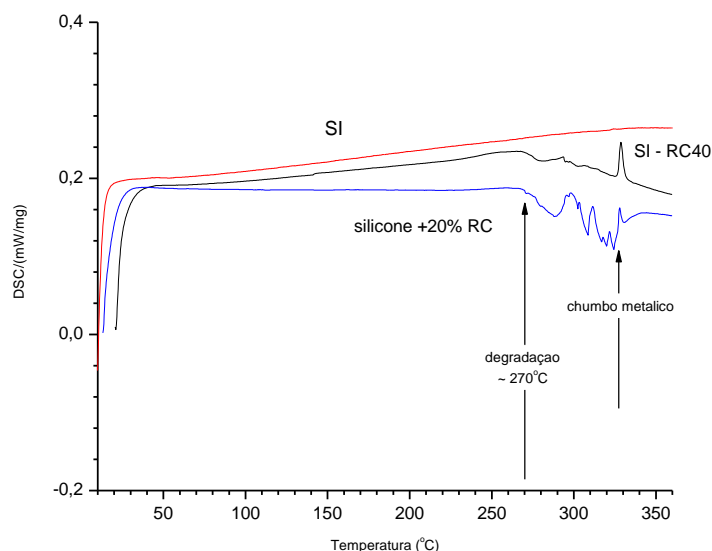
**FIGURA 4.9** – Curva de DSC do poliéster (UP) - (taxa de aquecimento de 10 °C /min, atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) e fluxo de 20 ml/min).

As curvas mostram que o poliéster, após a cura, apresenta um processo exotérmico no intervalo de temperatura de 90 a 150 °C, indicando a possibilidade de o material necessitar de um tratamento térmico caso este processo venha a contribuir para uma reação de degradação acelerada do material, chamando a atenção para um estudo futuro de durabilidade, de acordo com as condições de aplicação do material, exposição a altas temperaturas e radiação solar e contato com materiais de limpeza, entre outros.

A caracterização térmica do poliéster mostra que o material sofre degradação para temperatura superior a 300 °C, sendo este um limite para sua aplicação. No intervalo de temperatura estudado, entre 0 e 300 °C, mostra que o material não apresenta mudanças de fase de primeira ordem, indicando tratar-se de um polímero amorfo.

Após a análise dos materiais de referência, foram analisados os compósitos poliméricos: silicone branco + RC e poliéster + RC.

A Figura 4.10 mostra a caracterização das placas de silicone branco com proporções de 20 % e 40 % de resíduo de chumbo. Os compósitos de silicone branco com resíduo de chumbo, ensaiados no mesmo intervalo de temperatura, apresentam menor capacidade calorífica e menor estabilidade térmica ( $\approx 270$  °C), para ambas as concentrações de resíduo.



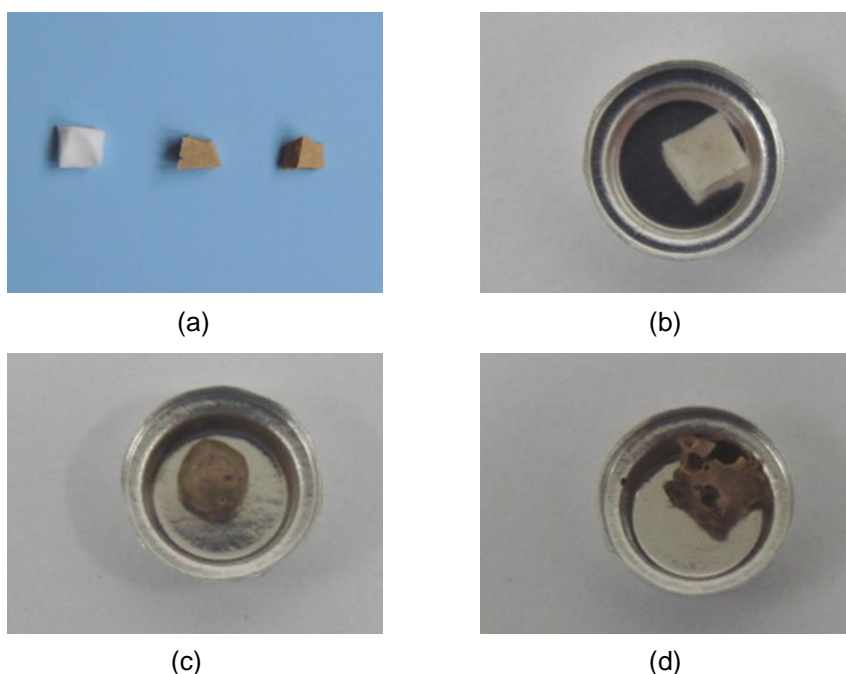
**FIGURA 4.10** – Curva de DSC do SI - RC (taxa de aquecimento de 10 °C /min, atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) e fluxo de 20 ml/min).

O comportamento da capacidade calorífica dos compósitos de silicone branco com resíduo de chumbo é menor se comparado com o silicone puro. Nota-se uma degradação em temperatura inferior ao silicone puro e ambas as concentrações apresentam um comportamento estável neste intervalo de temperatura.

O silicone é conhecido por sua alta resistência térmica, com boa estabilidade para temperatura de até 400 °C; no entanto, o comportamento térmico das amostras

de silicone com resíduo de chumbo apresentou uma degradação a partir de 270 °C. Na Figura 4.11 a amostra de silicone manteve sua forma geométrica após o ensaio de DSC, devido à característica de materiais reticulados, apresentando baixa oxidação, podendo ser observado na curva de calorimetria. A amostra, após o DSC, apresentou uma cor um pouco mais amarelada.

As amostras com resíduo de chumbo apresentaram forte distorção em sua geometria e uma tonalidade escura crescente com o teor de resíduo de chumbo. Nas curvas de DSC, a oscilação, a partir de 270 °C, apresenta uma degradação térmica, indicando que o silicone e o resíduo de chumbo interagem quimicamente.

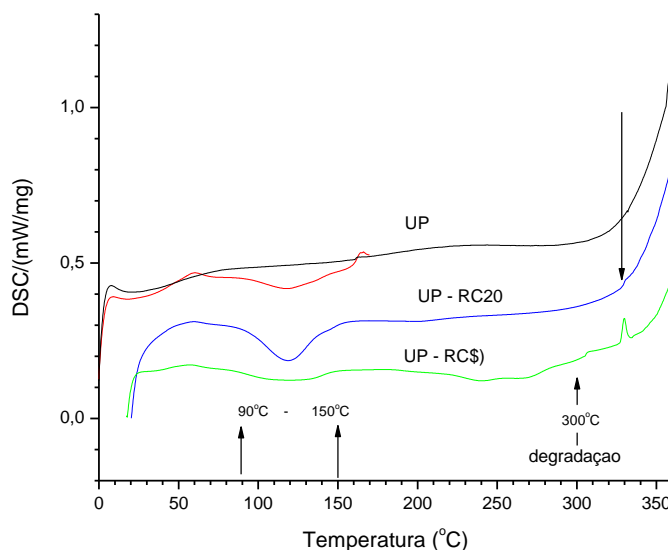


**FIGURA 4.11** – (a) Amostra do SI, SI – RC20 e SI – RC40 antes da aplicação da técnica de DSC. (b) Amostra do SI após a aplicação da técnica de DSC. (c) Amostra do SI – RC20 após a aplicação da técnica de DSC. (d) Amostra do SI – RC40 após a aplicação da técnica de DSC.

Conforme se nota na Figura 4.12, nas curvas de DSC dos compósitos poliméricos de poliéster com resíduo de chumbo, destaca-se a capacidade calorífica decrescente com o aumento do teor de resíduo de chumbo, em concordância com as respectivas capacidades caloríficas do polímero e do chumbo.

Na curva com 20 % de resíduo de chumbo, o processo exotérmico no intervalo de temperatura de 90 °C a 150 °C é mais acentuado e a fusão de chumbo é pouco observada, devido à superposição ao processo de degradação do polímero.

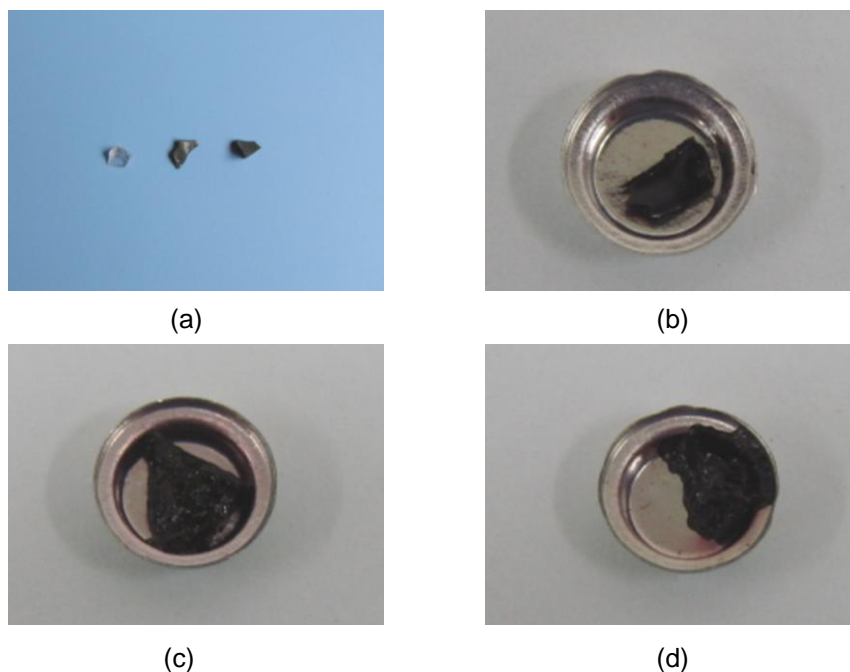
Na curva com 40 % de resíduo de chumbo, é notada a menor influência do polímero, onde o processo exotérmico é mais suave, indicando que pode levar a um melhor desempenho do material e podendo incorporar maior quantidade de resíduo de chumbo. É notada, ainda, a fusão do chumbo metálico no compósito com entalpia da ordem de 1,2 J/g na temperatura de 327 °C.



**FIGURA 4.12** – Curva de DSC do UP - RC (taxa de aquecimento de 10 °C /min, atmosfera inerte (N<sub>2</sub>) e fluxo de 20 ml/min).

O poliéster puro apresenta grande capacidade calorífica e uma degradação a partir de 300 °C; nas amostras com resíduo de chumbo nota-se um comportamento aditivo entre as curvas do resíduo de chumbo e do poliéster puro, aumentando a capacidade calorífica do compósito com a redução do teor de resíduo. O pico da fusão do chumbo metálico mostra-se sobre a curva do poliéster puro sendo mais pronunciado para o maior teor de resíduo.

As imagens da Figura 4.13 mostram a forte degradação do poliéster, passando de um material transparente a um material escuro com degradação térmica, característica de um processo de oxidação do material. Este comportamento também se observa nos compósitos com 20 % e 40 % de resíduo de chumbo.

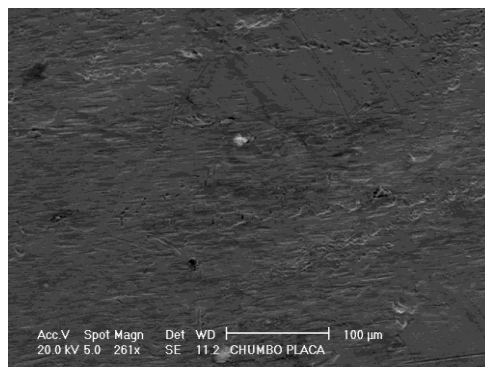


**FIGURA 4.13** – (a) Amostra do UP, UP – RC20 e UP – RC40 antes da aplicação da técnica de DSC. (b) Amostra do UP após a aplicação da técnica de DSC. (c) Amostra do UP – RC20 após a aplicação da técnica de DSC. (d) Amostra do UP – RC40 após a aplicação da técnica de DSC.

Na obtenção do compósito, o poliéster antes da cura é um líquido de baixa viscosidade, que facilita a dispersão e a decantação do resíduo. Esta característica indica que o poliéster pode incorporar maior teor de resíduo de chumbo.

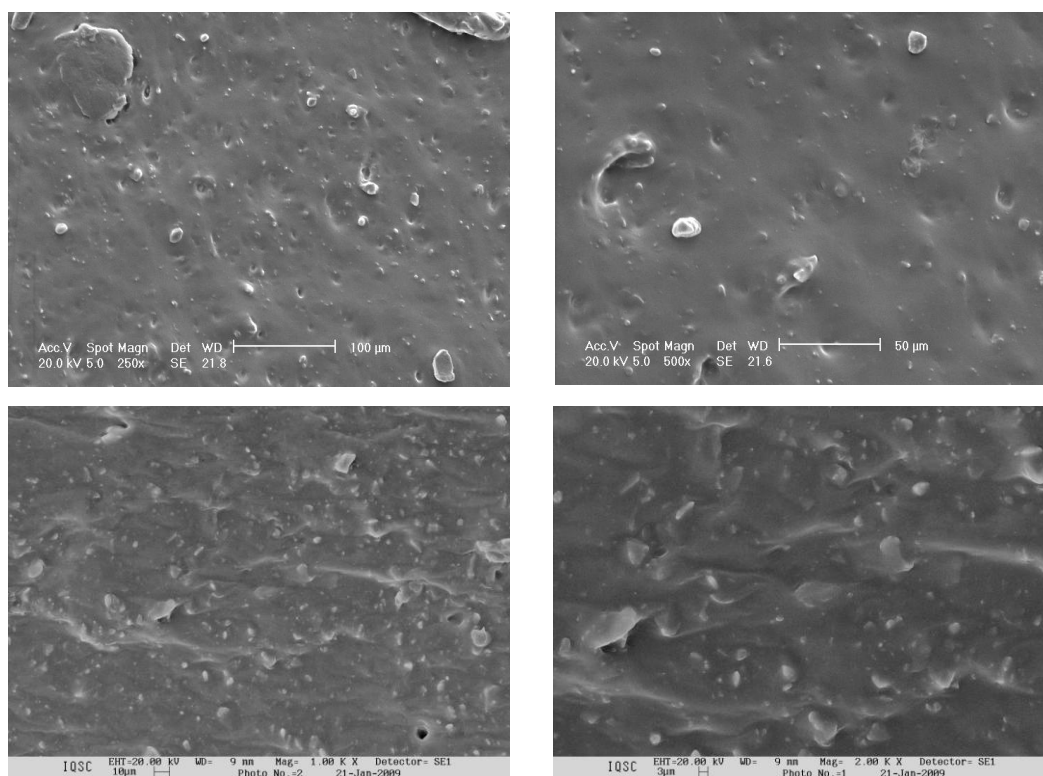
#### **4.6 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E REVESTIMENTOS METÁLICOS POR MEIO DA TÉCNICA DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)**

A Figura 4.14 apresenta a fotomicrografia da placa de chumbo sólido, material de referência. O chumbo sólido apresenta uma geometria homogênea com a presença de alguns poros na sua superfície. As regiões esbranquiçadas referem-se a contaminações.



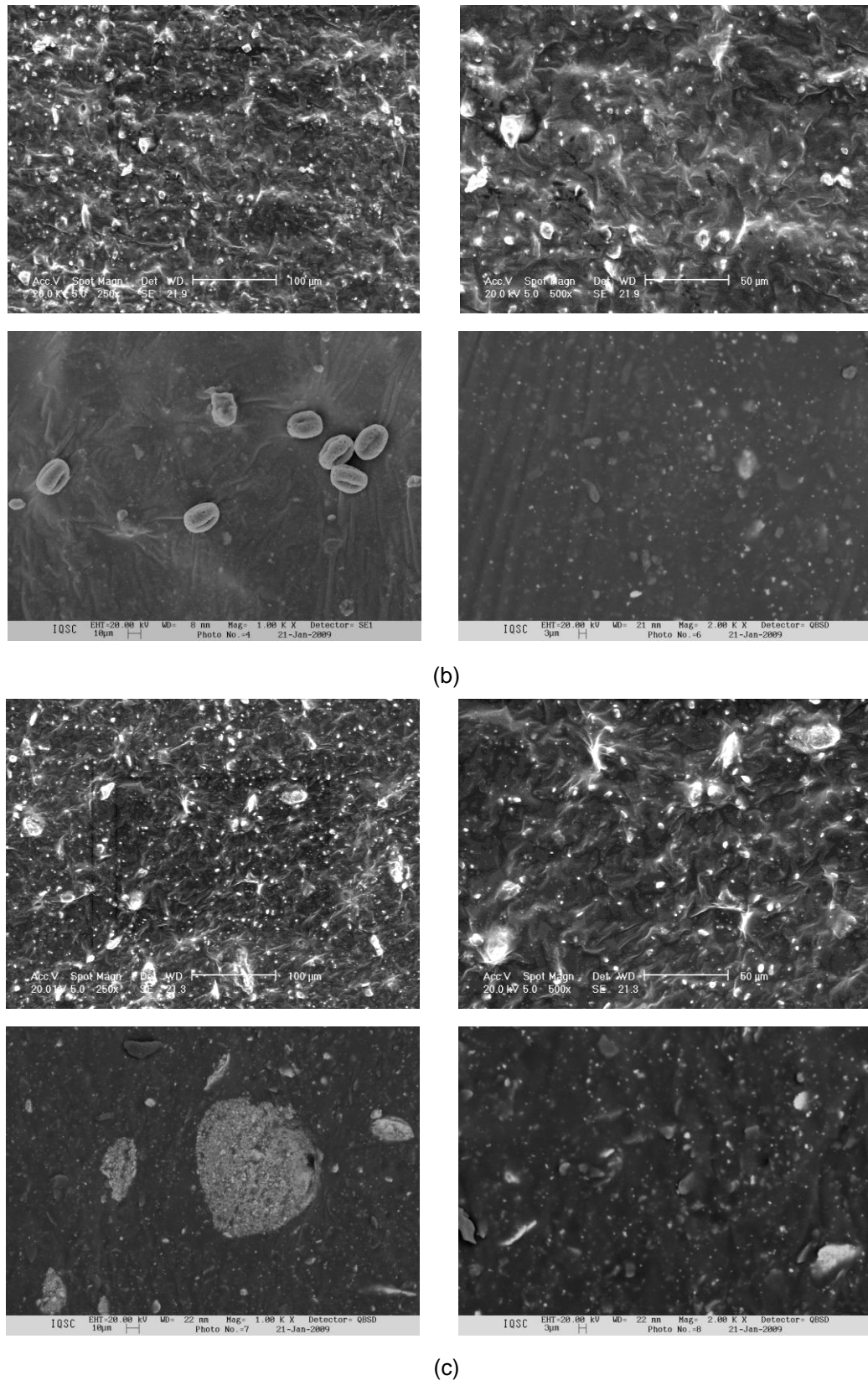
**FIGURA 4.14** – Fotomicrografia (260 X) do chumbo sólido.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as fotomicrografias dos compósitos poliméricos selecionados.



(a)





**FIGURA 4.15** – Fotomicrografias de amostras com borracha de silicone (SI). (a) SI puro. (b) SI – RC20. (c) SI – RC40. Aumento de (250X), (500X), (1000X) e (2000X).

A Figura 4.15 (a) mostra a superfície do silicone branco puro. Esta é bastante homogênea, com indício da presença de vazios abaixo da superfície analisada (pontos mais escuros, mostrados pelas setas brancas). Este defeito é proveniente da forma de mistura, no caso manual, que incorpora ar durante o processo.

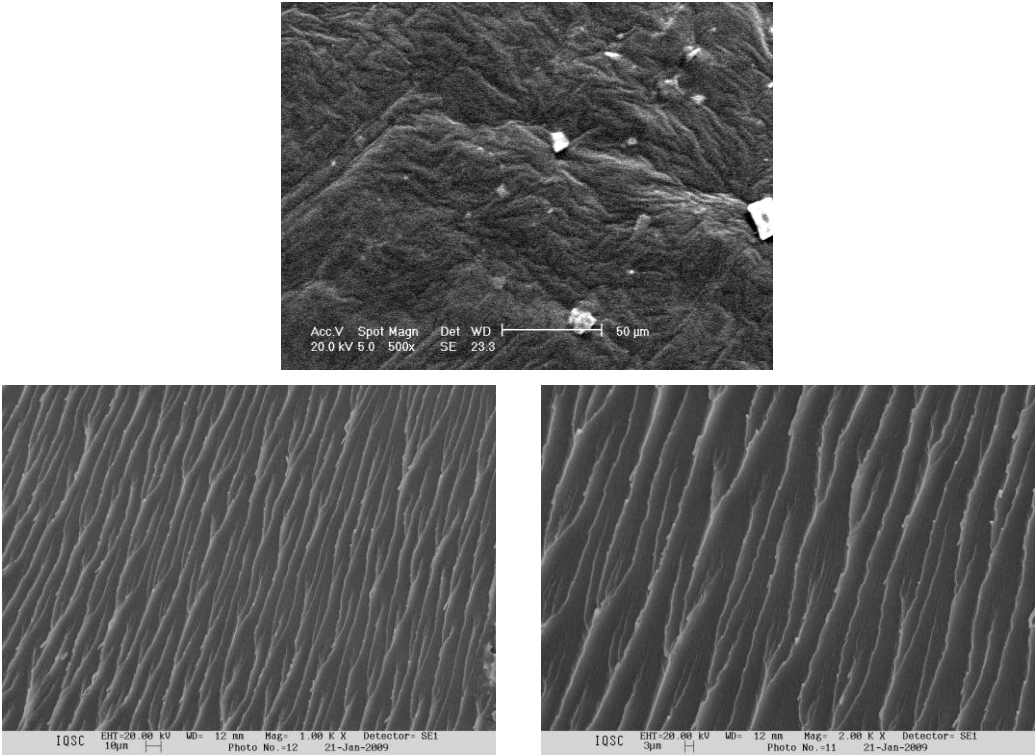
As Figuras 4.15 (b) e (c), referentes aos compósitos poliméricos de silicone branco + resíduo de chumbo na forma de pó nas proporções de 20 % e 40 % de resíduo, respectivamente, mostram a presença do resíduo bastante homogêneo nos tamanhos, formas e vazios. Em (c) pode-se observar a geometria do pó de resíduo de chumbo, cuja forma é oval e bastante porosa. Ainda, na Figura 4.15 (c), observa-se a presença de um vazio associado aos grãos do resíduo, possivelmente ao descolamento dos grãos.

Analisando as fotomicrografias dos compósitos poliméricos feitos com silicone branco na ampliação de 1000X, pode-se perceber com mais nitidez que a massa do silicone permaneceu inalterada, ou seja, permaneceu na condição amorfa.

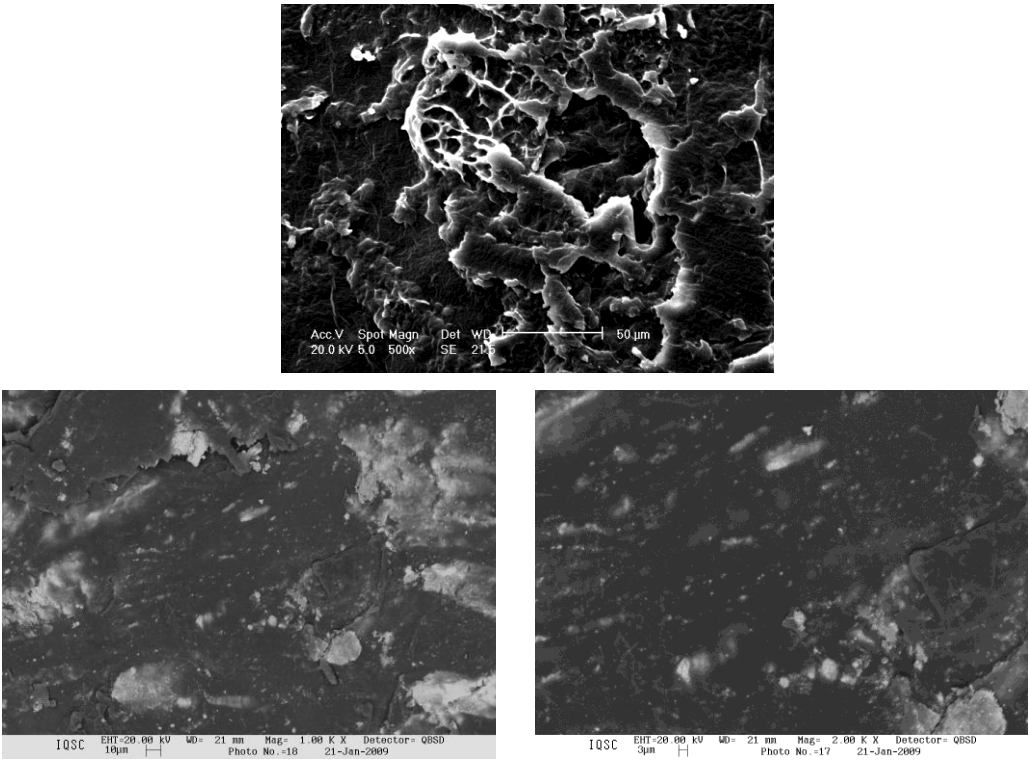
Os grandes aglomerados, visualizados nas fotomicrografias nas diferentes proporções de resíduo de chumbo, podem ser atribuídos ao elevado tempo de cura do silicone, uma vez que, mesmo após algumas horas de reação, durante sua síntese, ainda se verifica mobilidade de materiais dispersos, fato que possibilita a quebra da emulsão.

Esse fato não é verificado nos casos onde o resíduo de chumbo em pó encontra-se disperso em poliéster, já que este polímero tem um ponto de gel de apenas alguns minutos, obtendo grande parte de sua forma governada por ligações cruzadas, o que dificulta muito a mobilidade de qualquer material disperso em sua estrutura.

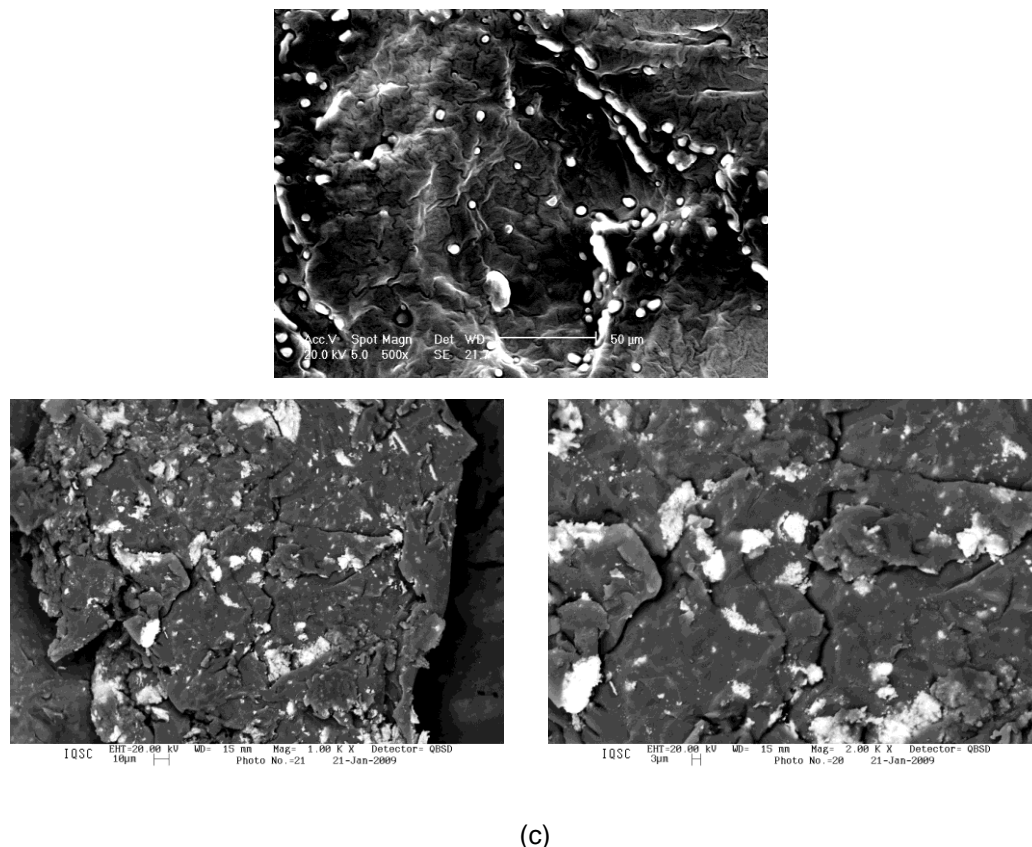
Pode-se verificar na Figura 4.16 (a) a presença de partículas na superfície avaliada. Isso se deve a contaminação da amostra. Na sequência de fotos da Figura 4.35 (a), o poliéster apresenta uma regularidade superficial.



(a)



(b)



**FIGURA 4.16** – Fotomicrografias de amostras com poliéster (UP). (a) UP puro. (b) UP – RC20. (c) UP – RC40. Aumento de (500X), (1000X) e (2000X).

Nas fotomicrografias subseqüentes, Figura 4.16 (b), quando se apresenta a imagem do compósito polímero-resíduo de chumbo na forma de pó na proporção de 20 % em massa de metal, observa-se que ocorre uma perda da regularidade visualizada no processo de cura do polímero puro. Nota-se que o avanço dessa perda de regularidade é bastante progressivo quando se analisa a imagem seguinte, Figura 4.16 (c), onde o resíduo de chumbo se apresenta na percentagem de 40 %. Quando o poliéster é associado ao resíduo de chumbo na forma de pó na proporção de 20 %, a distribuição dos grãos na matriz ocorre de forma uniforme, sem apresentar trincas nem descolamento dos grãos. Enquanto na Figura 4.16 (c) há uma incidência maior de vazios e trincas na matriz, permanecendo ainda uma distribuição homogênea dos grãos.

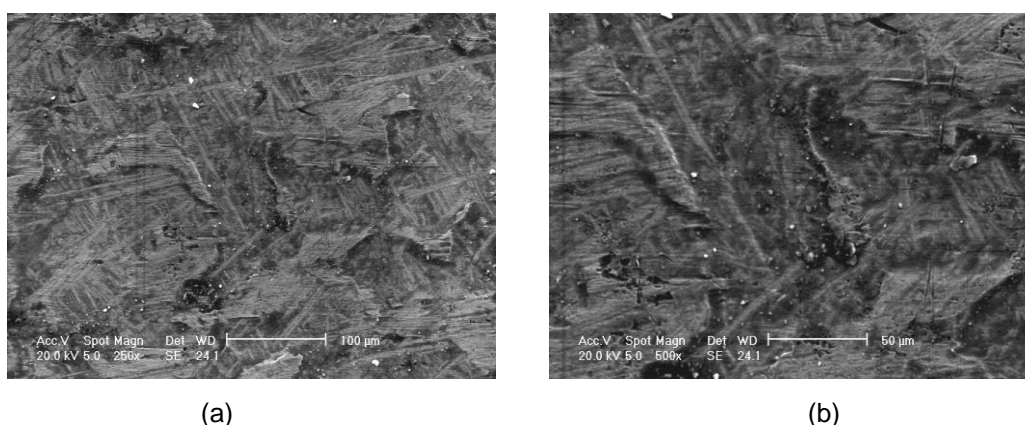
Em função da composição química do material, sugere-se que a presença do resíduo de chumbo proporcionou o aparecimento de regiões placóides, aparentemente homogêneas, associadas a outras regiões levemente pulverizadas e

esbranquiçadas, que, provavelmente, são constituídas do metal oxidado não participante da mistura polimérica.

Pode-se concluir que a mudança do comportamento do poliéster puro quanto a sua regularidade, se comparada à formação das placas quando adicionado o resíduo de chumbo, é um fator positivo para as propriedades de atenuação.

As análises microscópicas em ambos os compósitos poliméricos confirmam a presença de bolhas provenientes do processo de fabricação das placas e o molhamento não tão eficiente da carga (resíduo de chumbo em pó) pela matriz polimérica, o que pode influenciar na diminuição das propriedades mecânicas e de atenuação do material.

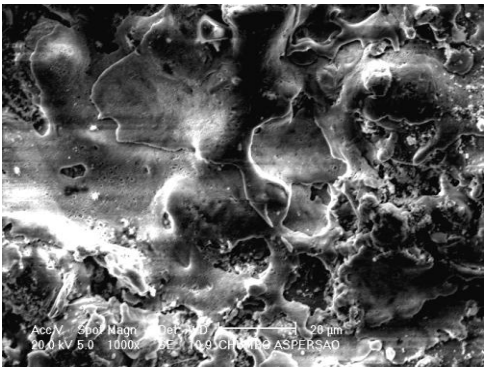
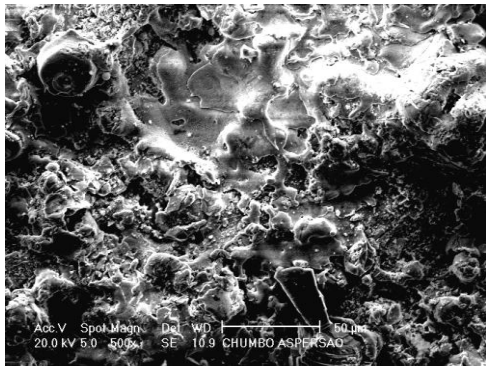
A Figura 4.17 mostra a fotomicrografia do aço carbono, material base para os revestimentos metálicos e a Figura 4.18 apresenta as fotomicrografias das placas de aço carbono revestidas com resíduo de chumbo (pó) por aspersão térmica.



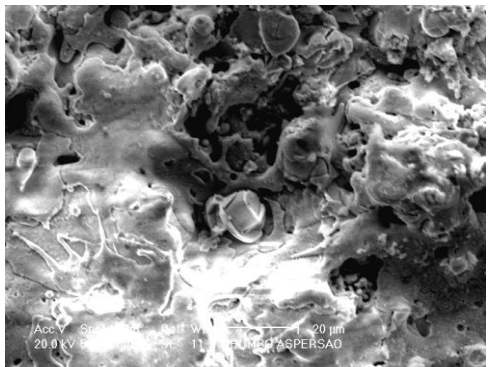
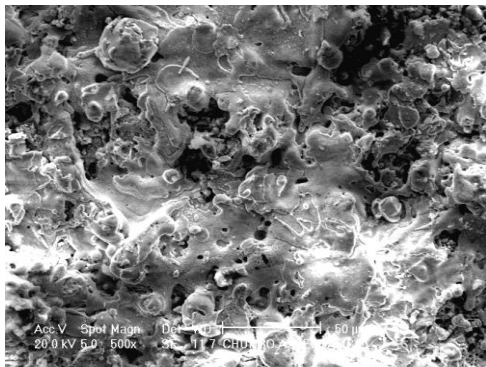
**FIGURA 4.17** – Fotomicrografia do aço carbono. (a) Aumento de 250X. (b) Aumento de 500X.

Na Figura 4.17 é apresentada a morfologia do aço carbono (material de referência) sem o processo de jateamento, o que resulta na rugosidade do substrato.

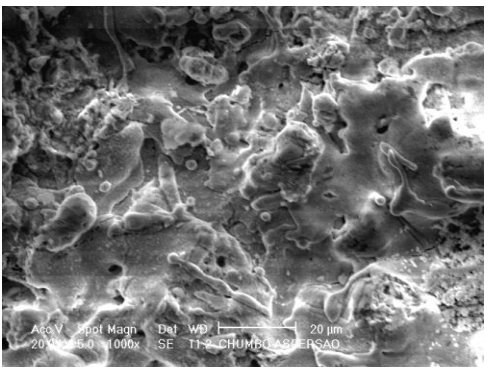
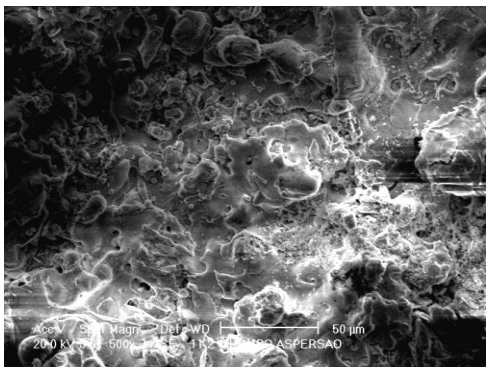
Mesmo se tratando de amostras diferentes, como mostrado na Figura 4.18, observa-se que o revestimento está composto de panquecas e que estas conservam a rugosidade do substrato.



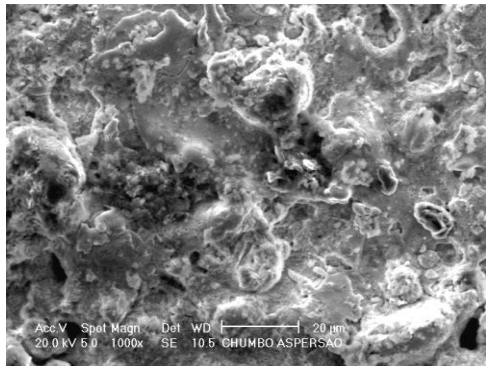
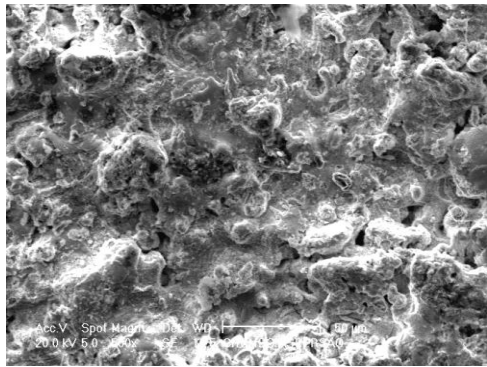
(a)



(b)

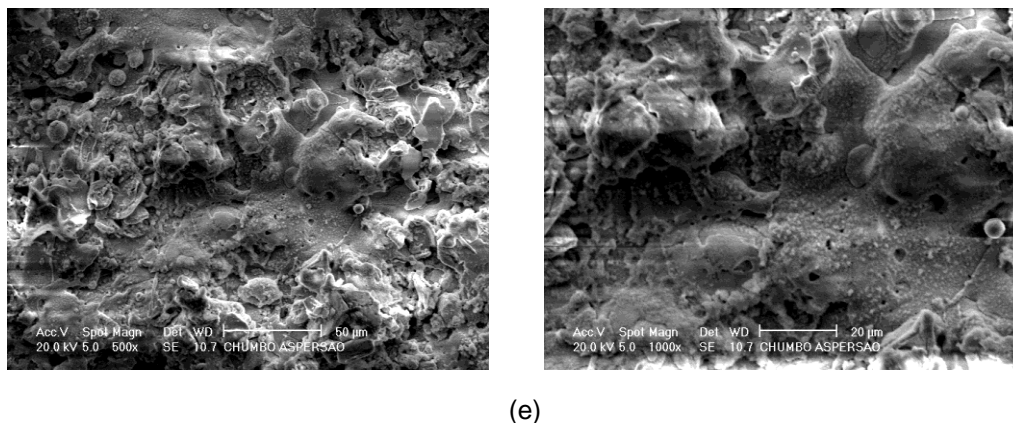


(c)



(d)



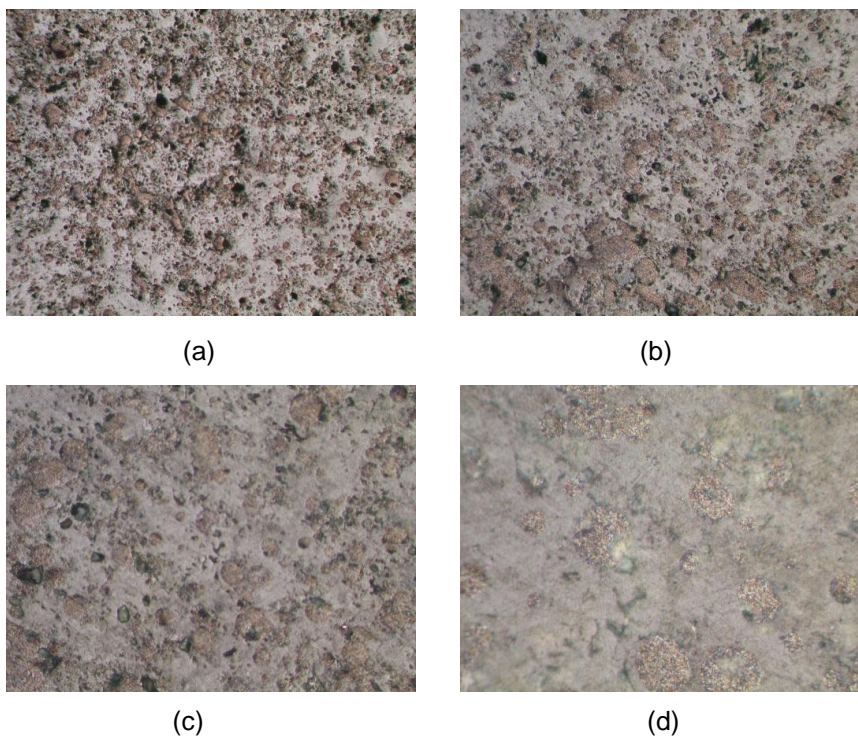


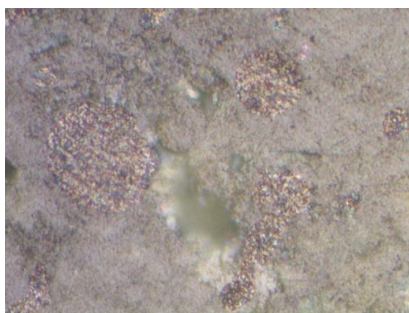
(e)

**FIGURA 4.18** – Fotomicrografias das amostras de aço carbono + RC (pó). (a) Amostra 1. (b) Amostra 2. (c) Amostra 3. (d) Amostra 4. (e) Amostra 5. Aumento de (500X) e (1000X).

#### 4.7 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA POR MEIO DA TÉCNICA DE MICROSCOPIA ÓTICA (OM) PARA OS REVESTIMENTOS METÁLICOS

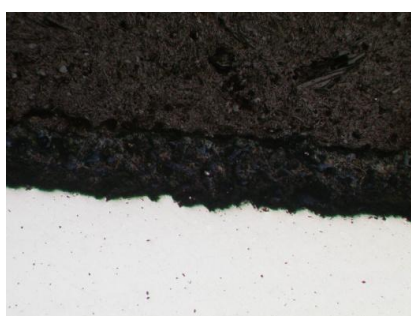
As Figuras 4.19 e 4.20 mostram o aspecto do revestimento (resíduo de chumbo em forma de pó) sobre o substrato (aço carbono), depositado por aspersão térmica na etapa inicial.



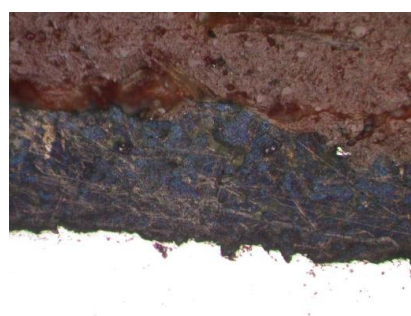


(e)

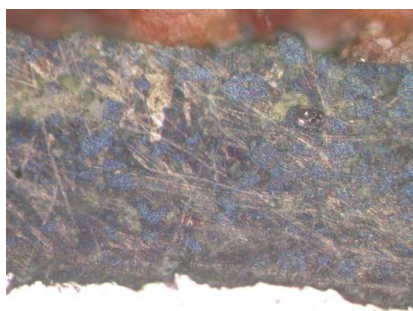
**FIGURA 4.19** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó). (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Resolução de 1000X.



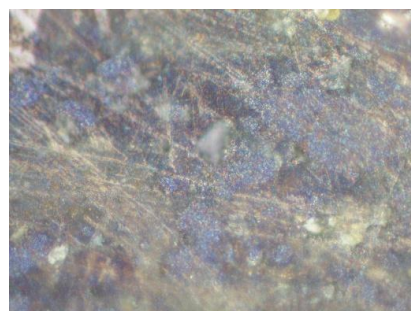
(a)



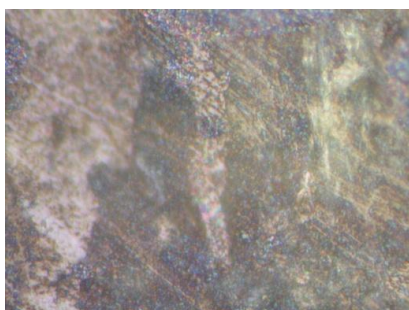
(b)



(c)



(d)



(e)

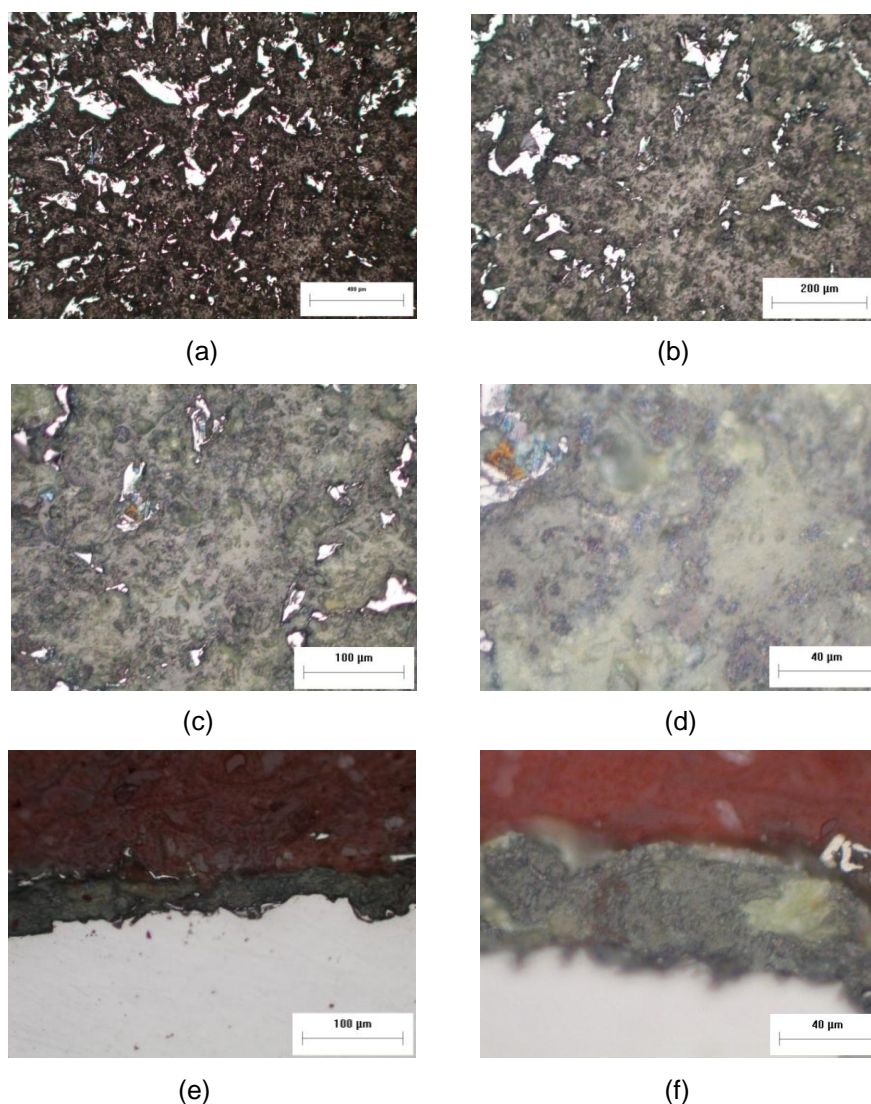
**FIGURA 4.20** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó). (a) Seção transversal do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Resolução de 1000X.



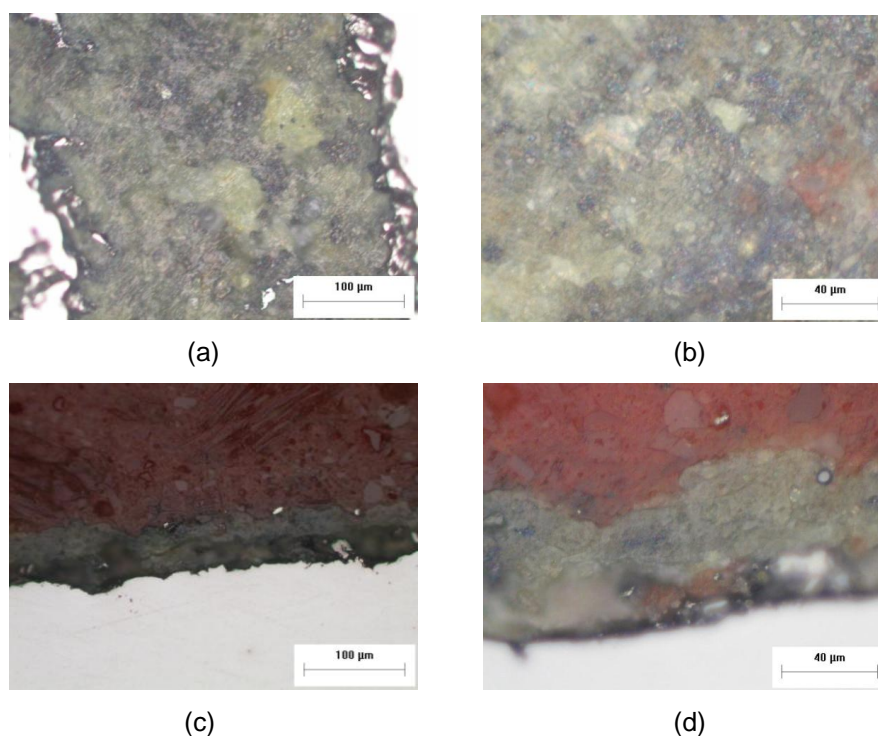
O resultado da espessura média, considerando cinco leituras, do revestimento foi de **51,04 ± 9,65 μm**. Após a análise das imagens, percebe-se que houve aderência da camada de resíduo de chumbo em relação ao substrato.

Para a pistola 6P-II – Thermospray Gun da marca SULZER METCO utilizada, observou-se que as partículas de resíduo de chumbo não volatilizaram, devido ao resfriamento no interior da pistola, mesmo com baixo ponto de fusão, como comprovado na técnica de DSC.

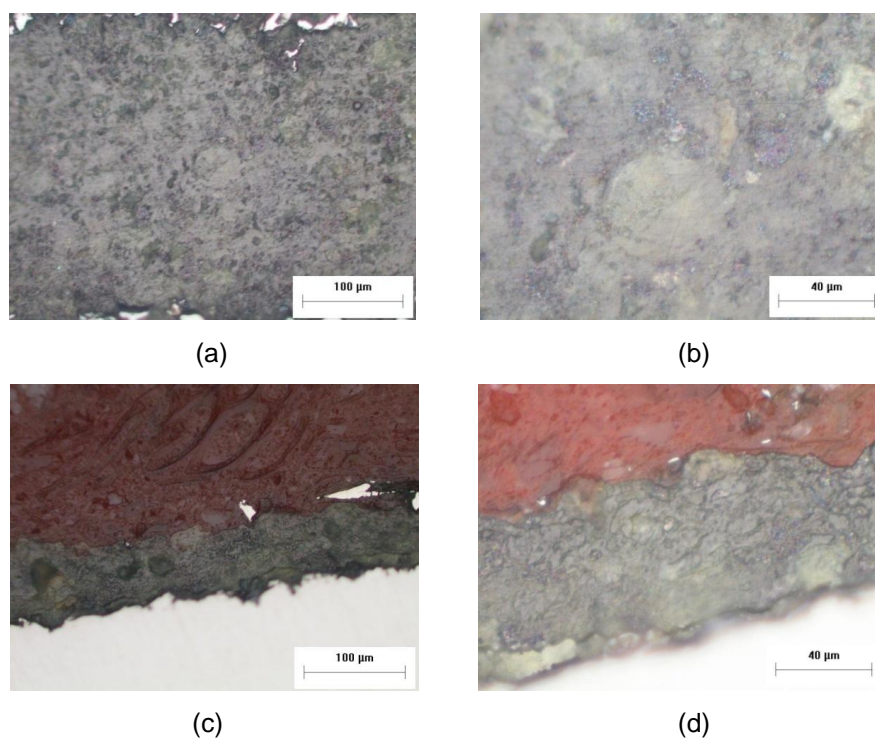
As amostras desenvolvidas a partir do processo de aspersão térmica na etapa final são mostradas nas Figuras 4.21 a 4.25.



**FIGURA 4.21** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 1. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. (f) Resolução de 500X.

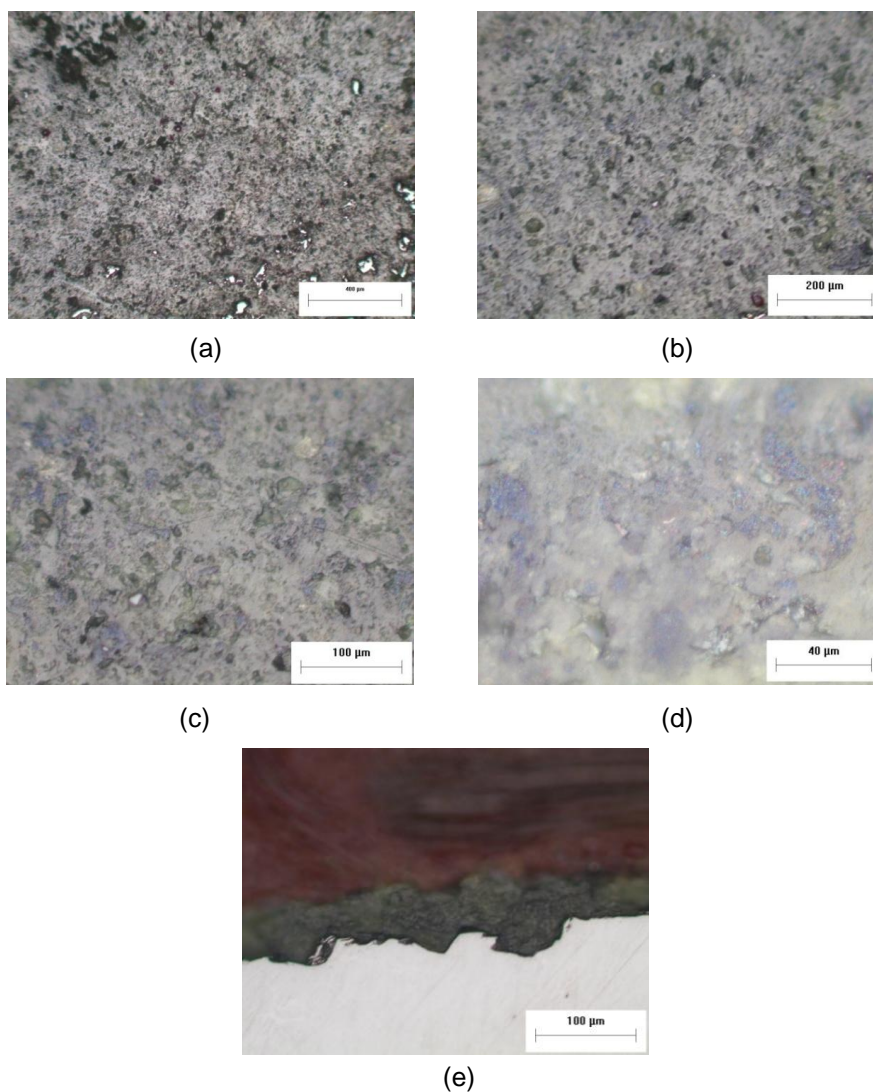


**FIGURA 4.22** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 2. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 200X. (b) Resolução de 500X. (c) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. (d) Resolução de 500X.

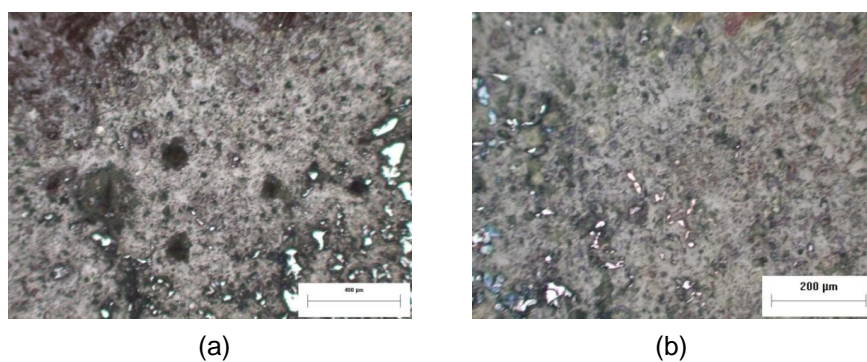


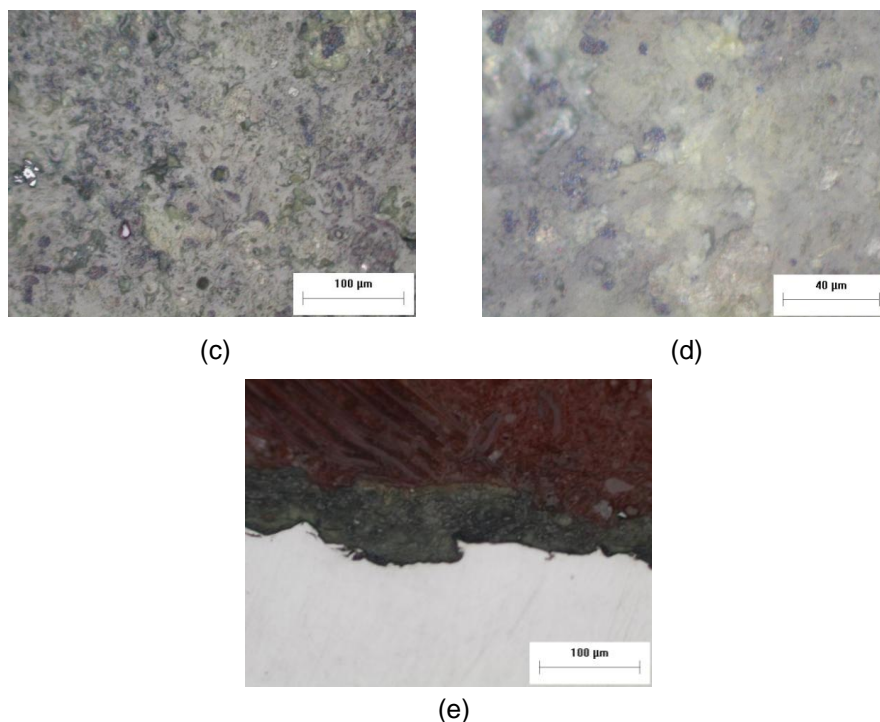
**FIGURA 4.23** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 3. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 200X. (b) Resolução de 500X. (c) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X. (d) Resolução de 500X.





**FIGURA 4.24** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 4. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X.





**FIGURA 4.25** – Micrografia ótica de placas aspergidas com resíduo de chumbo (pó) – Amostra 5. (a) Superfície do revestimento numa resolução de 50X. (b) Resolução de 100X. (c) Resolução de 200X. (d) Resolução de 500X. (e) Seção transversal do revestimento numa resolução de 200X.

Nas Figuras 4.21 a 4.25, observam-se a disposição típica de revestimentos aspergidos em camadas tipo panquecas, bastante homogêneos e com pequena quantidade de salpicos. As regiões mais escuras são poros ou vazios, enquanto que as regiões cinza são óxidos formados pelo contato com o oxigênio. Em geral, pode-se observar que nas amostras, os revestimentos são bastante homogêneos, com pouca oxidação, indicando uma boa aderência.

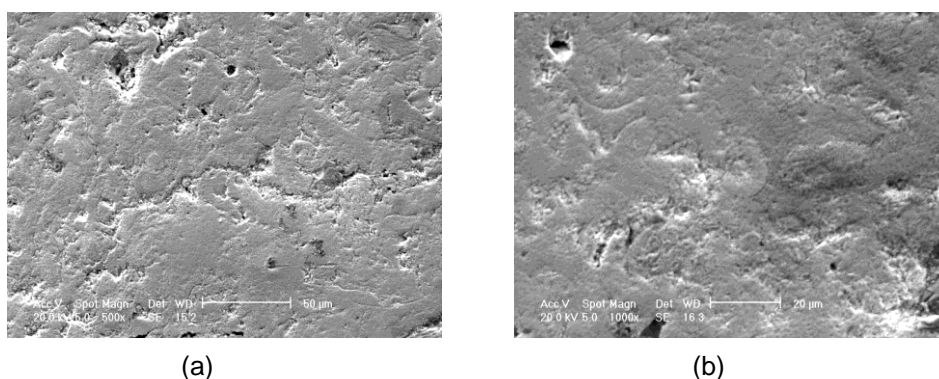
O resultado da espessura média do revestimento, considerando-se cinco posições para cada amostra, está mostrado na Tabela 4.8.

**TABELA 4.8** – Espessura dos revestimentos aspergidos.

| MATERIAIS | Espessura (µm) |
|-----------|----------------|
| Amostra 1 | 44,050 ± 5,148 |
| Amostra 2 | 56,114 ± 6,750 |
| Amostra 3 | 65,417 ± 4,329 |
| Amostra 4 | 49,529 ± 3,920 |
| Amostra 5 | 70,020 ± 8,228 |

O controle das espessuras das camadas é uma das características mais relevantes na proteção radiológica. Quanto maior a espessura da camada depositada, melhor será a capacidade de atenuação deste material. Deve-se levar, também, em consideração que a espessura deve ser uniforme, para não haver variação na quantidade de exposição do material. Porém, esta é uma dificuldade real, pois a deposição foi feita manualmente, ocorrendo alguma variação nas espessuras das camadas depositadas.

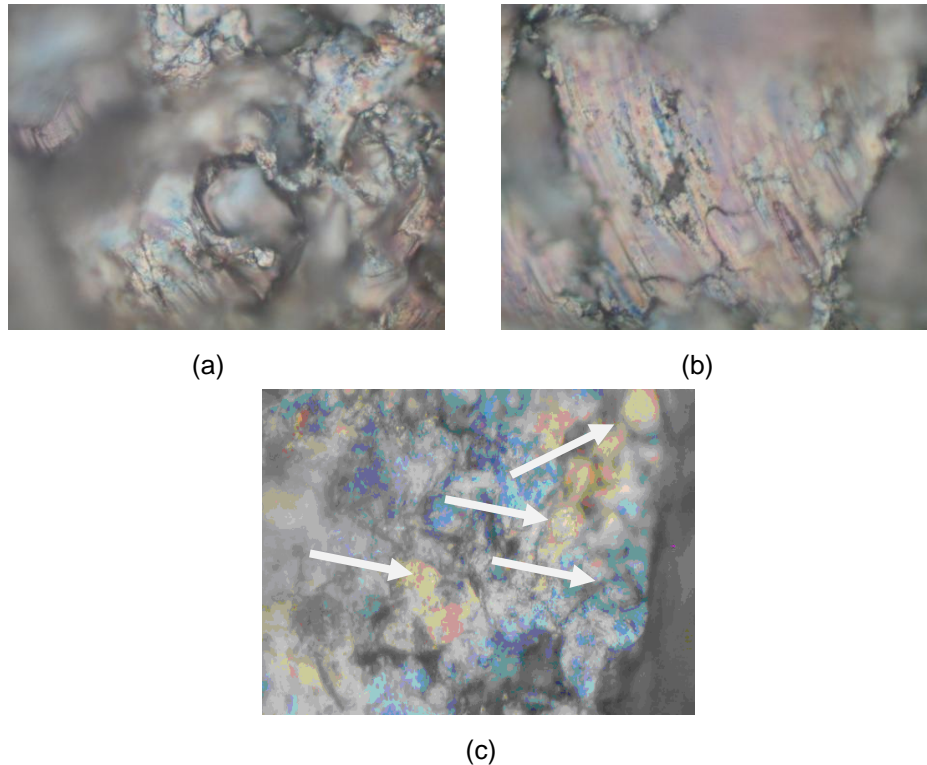
Com base na Figura 4.26 obtida por microscopia ótica, que mostra a vista superficial do revestimento, pode-se notar em (a), que o revestimento é bastante homogêneo, com pequenos poros alocados nos contornos das panquecas, e em (b), que na superfície do revestimento é mais notória ainda a homogeneidade, o que caracteriza um excelente revestimento para atuar como barreira.



**FIGURA 4.26** – Fotomicrografia da vista da superfície do revestimento de resíduo de chumbo depositado por AT a chama. (a) Aumento de 500X. (b) Aumento de 1000X.

A Figura 4.27 mostra a vista transversal do revestimento de resíduo de chumbo depositado por aspersão térmica pelo processo à chama. Na Figura 4.27(a) observa-se que o revestimento está composto de panquecas e que estas conservam a rugosidade do substrato e que cada panqueca está contornada por óxido de chumbo. Na Figura 4.27(b) nota-se de forma mais clara a formação de óxidos de chumbo, destacando-se que os filmes de óxidos nos contornos das panquecas são mais espessos e os formados no interior das mesmas são mais finos. Nas duas figuras observa-se que a quantidade

de poros é pequena, o que mostra que o procedimento de deposição utilizado permite formar um revestimento de elevada aderência e de forma coesa, característica dos revestimentos de baixa porosidade.

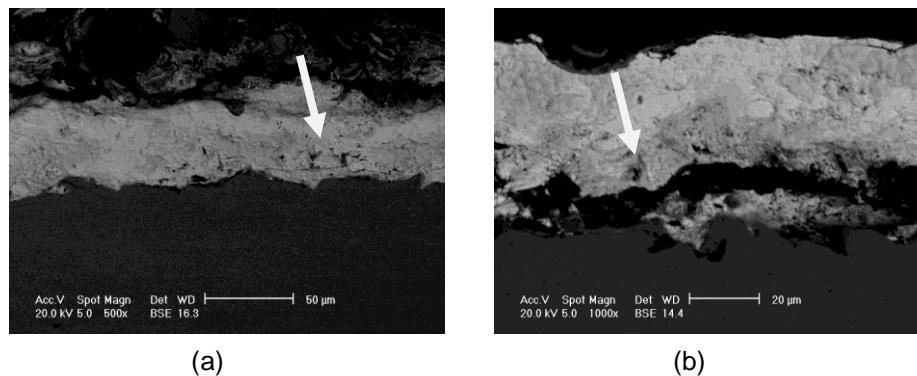


**FIGURA 4.27** – Micrografia ótica da vista da superfície do revestimento depositado por AT à chama a pó - Aumento de 500X.

Observando a Figura 4.27(c) percebe-se outra característica importante, a formação de salpicos, que aparecem principalmente no momento do impacto das gotas de chumbo no substrato. As gotas, com o impacto, rompem-se e formam gotículas menores (indicado por setas), que quase não se deformam, sendo que a formação dos óxidos de chumbo fica restrita ao contorno da panqueca esférica e não em seu interior. Isso confirma que, no interior das panquecas (Figuras 4.27(a) e (b)) durante o impacto, deformam e originam trincas. Estas oxidam e ficam presas no interior das panquecas através do calor que transferem após a deposição das panquecas subsequentes.

A Figura 4.28 (a), de outra área do revestimento, confirma que o revestimento contém pouca porosidade (a indicada por setas) -se observar, também, uma coloração cinza de maior e menor intensidade, o que indica

que parte do resíduo de chumbo se encontra na forma de óxido. Na Figura 4.28(b), observa-se que o revestimento se apresenta com pouca porosidade, com alguns salpicos pequenos e esféricos bem aderidos. A coloração mais cinza pode indicar uma maior quantidade de óxido de chumbo.

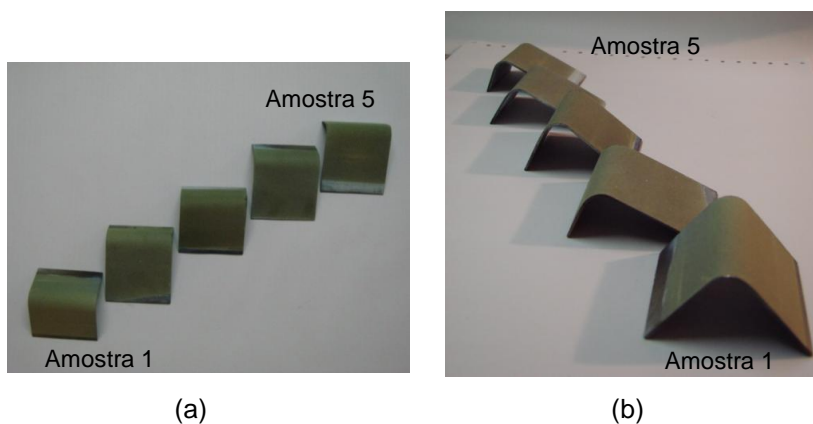


**FIGURA 4.28** – Fotomicrografia da vista transversal do revestimento depositado por AT à chama. (a) Aumento de 500X. (b) Aumento de 1000X.

## 4.8 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS

### 4.8.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Após as placas de aço serem aspergidas com o resíduo de chumbo, as amostras foram colocadas em uma prensa hidráulica para fazer o dobramento da chapa. A Figura 4.29 mostra os corpos de prova após o ensaio de dobramento.



**FIGURA 4.29** – Resultado do dobramento das amostras aspergidas com resíduo de chumbo (pó). (a) Imagem superior e (b) Imagem lateral das amostras revestidas.



Observa-se, que o revestimento submetido ao ensaio de dobramento não apresenta trincas a olho nu. Isso se deve à boa aderência no substrato e a boa coesão entre as lamelas (panquecas). Conforme a norma Petrobras N-2568, o revestimento não pode ter indícios de laminação, trincamento grosseiro e *debonding* (deslocamento do revestimento). Pode-se afirmar, então, que o revestimento está aprovado e tem excelente aderência e coesão da camada, classificado como ideal. Esses resultados demonstram que as cinco amostras são qualificadas para avaliar a porosidade e a aderência.

O ensaio de dobramento é somente qualitativo. No entanto, é mais adequado que o ensaio de aderência por tração, muito dependente da qualidade do adesivo para colar os corpos de prova, pois, na maioria dos casos, a ruptura ocorre no adesivo. Além disso, o ensaio de aderência por dobramento submete o revestimento a esforços extremos, superiores aos submetidos no ensaio de tração.

#### 4.8.2 MEDIDAS DE RUGOSIDADE

Com o intuito de avaliar a influência da rugosidade na aderência do revestimento e consequentemente nas propriedades de atenuação, foram feitas dez medidas das rugosidades em cada corpo de prova antes e após o processo de aspersão térmica. As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentaram os valores de rugosidades. Os valores encontrados foram suficientes para manter a boa aderência do revestimento ao substrato, como verificado no ensaio de dobramento.

**TABELA 4.9** – Rugosidade do substrato jateado antes de ser revestido com resíduo de chumbo.

| MATERIAIS | $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) | $R_y$ ( $\mu\text{m}$ ) | $R_z$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Amostra 1 | $7,346 \pm 0,777$       | $46,826 \pm 3,774$      | $46,852 \pm 4,125$      |
| Amostra 2 | $8,646 \pm 0,630$       | $52,476 \pm 5,485$      | $53,423 \pm 4,964$      |
| Amostra 3 | $8,992 \pm 0,850$       | $53,04 \pm 4,903$       | $54,585 \pm 6,336$      |
| Amostra 4 | $7,890 \pm 0,498$       | $48,372 \pm 3,567$      | $49,033 \pm 4,501$      |
| Amostra 5 | $6,357 \pm 0,735$       | $40,301 \pm 4,157$      | $40,064 \pm 4,397$      |



**TABELA 4.10** – Rugosidade do substrato jateado após de ser revestido com resíduo de chumbo.

| MATERIAIS | R <sub>a</sub> (μm) | R <sub>y</sub> (μm) | R <sub>z</sub> (μm) |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Amostra 1 | 7,507 ± 0,878       | 41,804 ± 5,952      | 41,757 ± 5,039      |
| Amostra 2 | 8,699 ± 0,868       | 46,427 ± 5,160      | 46,427 ± 5,160      |
| Amostra 3 | 8,152 ± 1,170       | 43,24 ± 5,672       | 43,24 ± 5,672       |
| Amostra 4 | 7,646 ± 0,679       | 41,903 ± 3,255      | 41,903 ± 3,255      |
| Amostra 5 | 7,580 ± 0,890       | 40,125 ± 3,203      | 40,125 ± 3,203      |

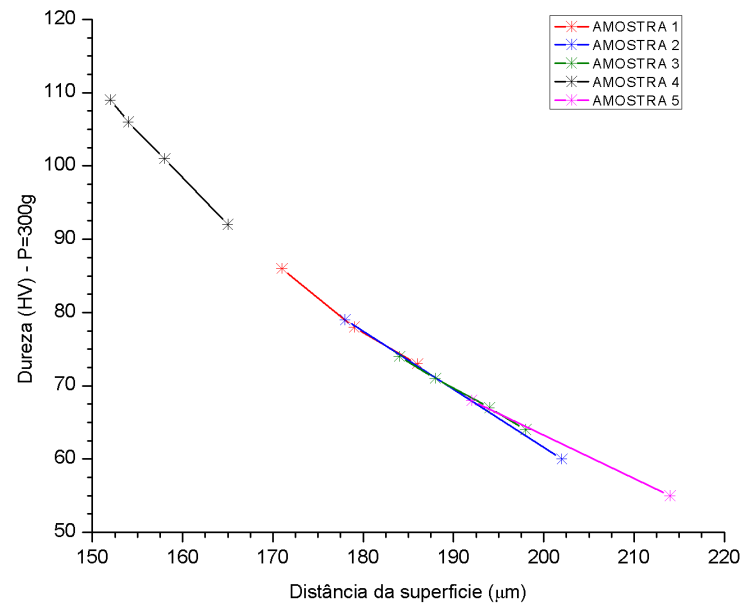
#### 4.8.3 MEDIDAS DA MICRODUREZA VICKERS

Os valores da microdureza estão apresentados na Tabela 4.11.

**TABELA 4.11** – Microdureza *Vickers* (HV) em função da distância da superfície do revestimento.

| MATERIAIS | Microdureza Vickers (HV) |
|-----------|--------------------------|
| Amostra 1 | 79,400 ± 7,334           |
| Amostra 2 | 82,000 ± 23,640          |
| Amostra 3 | 82,333 ± 21,694          |
| Amostra 4 | 98,833 ± 22,498          |
| Amostra 5 | 159,000 ± 49,497         |

A figura 4.30 mostra o perfil de microdureza para as cinco amostras aspergidas com resíduo de chumbo na forma de pó. De acordo com os resultados da microdureza transversal da camada, pode-se afirmar que a dureza superficial do revestimento de resíduo de chumbo é pequena, se comparada aos valores do aço carbono – 2100 HV, por exemplo. Porém, todos os valores obtidos foram superiores ao valor de referência para chumbo metálico – 60 HV existente na literatura. Pode-se inferir que a presença de óxido de chumbo no revestimento propicia revestimentos mais resistentes ao desgaste.



**FIGURA 4.30** – Perfil de microdureza para os compósitos metálicos – aço carbono + resíduo de chumbo (na forma de pó) obtidos experimentalmente.

Ainda é notável a grande dispersão dos valores de microdureza obtidos. Percebe-se que a dureza diminui com o aumento da distância da superfície. Isso se deve ao fato que o chumbo é um material muito maleável.

#### 4.9 CARACTERIZAÇÃO QUANTO À ATENUAÇÃO DOS COMPÓSITOS

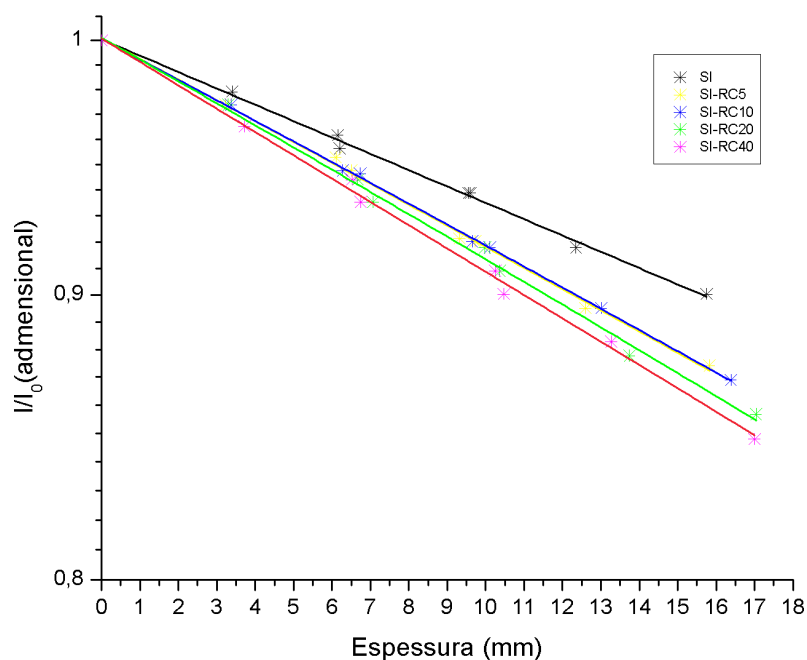
A caracterização quanto à atenuação dos compósitos poliméricos se deu em duas etapas: a primeira para avaliar o desempenho de todas as formulações em relação à atenuação a radiação gama quanto à radiação X e a segunda, após a escolha dos melhores compósitos, os materiais selecionados foram expostos novamente para obter os resultados dos fatores de atenuação para à radiação gama e à radiação X e imagens radiográficas na exposição de raios X.

#### 4.9.1 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS – ETAPA INICIAL

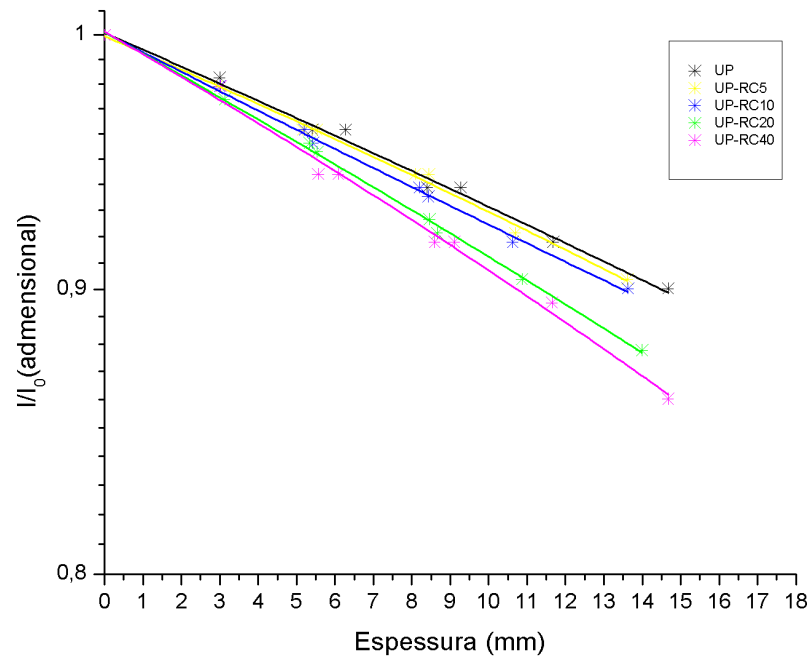
##### 4.9.1.1 Escolha do Melhor Compósito a partir da Irradiação com Raios Gama

A análise do comportamento das curvas de atenuação, provenientes da exposição com radiação gama, possibilitou a escolha de compósitos mais eficientes a serem desenvolvidos, de acordo com o Índice de Atenuação.

Nas figuras 4.31 e 4.32 estão mostradas as curvas de atenuação para os diversos compósitos. Os gráficos apresentados mostram o Índice de Atenuação (adimensional) em relação à espessura do compósito (mm). A função do gráfico é exponencial decrescente.



**FIGURA 4.31** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama.



**FIGURA 4.32** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com poliéster e resíduo de chumbo e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama.

Os resultados do Índice de Atenuação, como função das espessuras (x) das placas poliméricas de silicone e poliéster, são apresentados na Tabela 4.12.

**TABELA 4.12-** Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação gama, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm).

| SILICONE BRANCO (SI) |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| SI                   |                            | SI – RC5             |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                     | 0,0                  | 1,0000                     |
| 3,4 ± 0,3            | 0,9790                     | 3,2 ± 0,2            | 0,9738                     |
| 6,2 ± 0,1            | 0,9615                     | 6,1 ± 0,2            | 0,9528                     |
| 6,2 ± 0,2            | 0,9563                     | 6,5 ± 0,2            | 0,9475                     |
| 9,6 ± 0,2            | 0,9388                     | 9,3 ± 0,5            | 0,9213                     |
| 9,6 ± 0,3            | 0,9388                     | 9,7 ± 0,3            | 0,9202                     |
| 12,4 ± 0,3           | 0,9178                     | 12,6 ± 0,4           | 0,8951                     |
| 15,8 ± 0,1           | 0,9003                     | 15,8 ± 0,6           | 0,8741                     |

| SI – RC10            |                                     | SI – RC20            |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              | 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,4 ± 0,1            | 0,9738                              | 3,3 ± 0,1            | 0,9738                              |
| 6,3 ± 0,2            | 0,9476                              | 6,7 ± 0,2            | 0,9440                              |
| 6,7 ± 0,2            | 0,9464                              | 7,1 ± 0,1            | 0,9353                              |
| 9,7 ± 0,3            | 0,9202                              | 10,0 ± 0,2           | 0,9178                              |
| 10,1 ± 0,3           | 0,9178                              | 10,4 ± 0,2           | 0,9091                              |
| 13,0 ± 0,4           | 0,8951                              | 13,7 ± 0,3           | 0,8776                              |
| 16,4 ± 0,4           | 0,8689                              | 17,0 ± 0,2           | 0,8566                              |

| SI – RC40            |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,7 ± 0,3            | 0,9650                              |
| 6,5 ± 0,0            | 0,9440                              |
| 6,8 ± 0,2            | 0,9353                              |
| 10,3 ± 0,3           | 0,9091                              |
| 10,5 ± 0,6           | 0,9003                              |
| 13,3 ± 0,2           | 0,8829                              |
| 17,0 ± 0,6           | 0,8479                              |

| POLIÉSTER (UP)       |                                     |                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| UP                   |                                     | UP – RC5             |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              | 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,0 ± 0,3            | 0,9825                              | 2,9 ± 0,1            | 0,9790                              |
| 5,4 ± 0,2            | 0,9615                              | 5,2 ± 0,3            | 0,9615                              |
| 6,3 ± 0,4            | 0,9615                              | 5,5 ± 0,2            | 0,9615                              |
| 8,4 ± 0,5            | 0,9388                              | 8,1 ± 0,3            | 0,9440                              |
| 9,3 ± 0,8            | 0,9388                              | 8,4 ± 0,4            | 0,9440                              |
| 11,7 ± 0,8           | 0,9178                              | 10,7 ± 0,6           | 0,9213                              |
| 14,7 ± 1,0           | 0,9003                              | 13,6 ± 0,6           | 0,9038                              |
| UP – RC10            |                                     | UP – RC20            |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              | 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,0 ± 0,3            | 0,9790                              | 3,1 ± 0,3            | 0,9738                              |
| 5,2 ± 0,3            | 0,9615                              | 5,3 ± 0,3            | 0,9563                              |
| 5,4 ± 0,3            | 0,9563                              | 5,5 ± 0,3            | 0,9528                              |
| 8,2 ± 0,7            | 0,9388                              | 8,5 ± 0,2            | 0,9266                              |
| 8,4 ± 0,5            | 0,9353                              | 8,7 ± 0,3            | 0,9213                              |
| 10,6 ± 0,4           | 0,9178                              | 10,9 ± 0,5           | 0,9038                              |
| 13,6 ± 0,8           | 0,9003                              | 14,0 ± 0,2           | 0,8776                              |

| UP – RC40               |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA<br>(mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                     | 1,0000                     |
| $3,0 \pm 0,3$           | 0,9790                     |
| $5,6 \pm 0,2$           | 0,9440                     |
| $6,1 \pm 0,3$           | 0,9440                     |
| $8,6 \pm 0,6$           | 0,9178                     |
| $9,1 \pm 0,4$           | 0,9178                     |
| $11,7 \pm 0,2$          | 0,8951                     |
| $14,7 \pm 0,4$          | 0,8601                     |

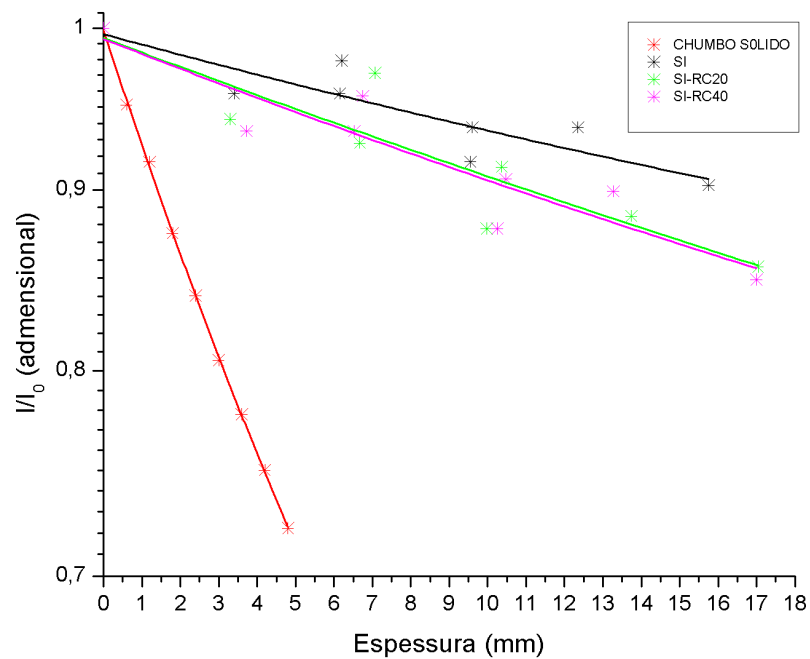
Obs.: Os valores do Índice de Atenuação são resultado de três medições de atenuação feitas no eletrômetro sem variação na leitura. Durante as medições não houve variação de temperatura e pressão na sala.

Analisando as curvas de atenuação, função dos fatores de atenuação para cada espessura, pode-se constatar que quanto maior for o teor de resíduo de chumbo adicionado ao polímero, maior será o Índice de Atenuação, o que corresponde a um aumento da atenuação dos compósitos quando expostos à radiação gama. Os compósitos que apresentam melhor desempenho são os confeccionados com 40% e 20% de resíduo de chumbo, sendo os primeiros mais eficientes para proteção da radiação gama.

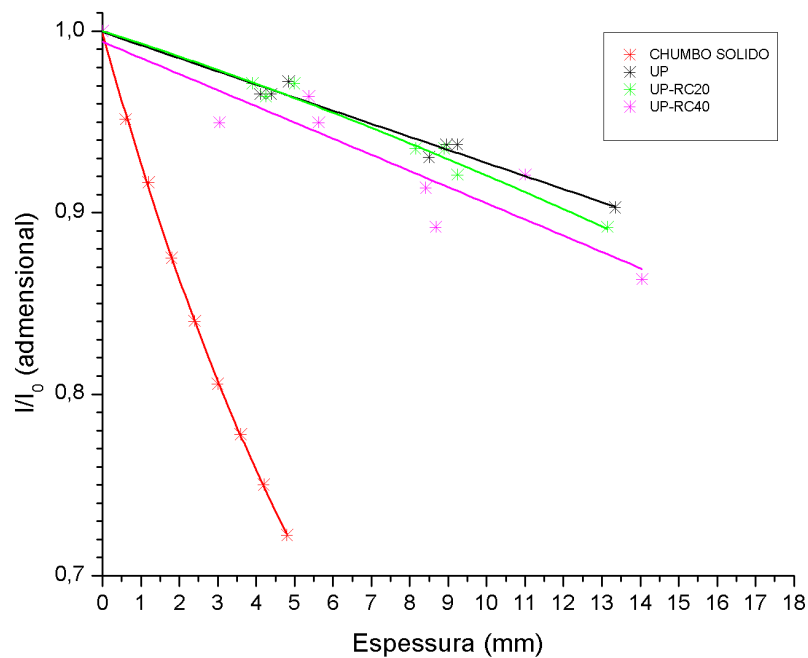
#### 4.9.1.2 Determinação dos Fatores de Atenuação para os Melhores Compósitos a partir da Irradiação com Raios Gama

Após a análise do comportamento das curvas de atenuação, provenientes da exposição com radiação gama para as diversas formulações, optou-se pelos compósitos mais eficientes a serem desenvolvidos, de acordo com a avaliação da Curva de Atenuação.

As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam as curvas de atenuação para os diversos compósitos poliméricos. Os gráficos apresentados mostram o Índice de Atenuação (adimensional) em relação à espessura do compósito (mm). A função do gráfico é exponencial decrescente.



**FIGURA 4.33** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama (compósito selecionado).



**FIGURA 4.34** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de radiação gama (compósito selecionado).

Os resultados do Índice de Atenuação, como função das espessuras ( $x$ ) das placas poliméricas de silicone e poliéster selecionados, são apresentados na Tabela 4.13.

**TABELA 4.13** - Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação gama, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados.

| SILICONE BRANCO (SI) |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | SI                   |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                     | 0,0                  | 1,0000                     |
| 0,6                  | 0,9514                     | $3,4 \pm 0,3$        | 0,9583                     |
| 1,2                  | 0,9167                     | $6,2 \pm 0,1$        | 0,9583                     |
| 1,8                  | 0,8750                     | $6,2 \pm 0,2$        | 0,9792                     |
| 2,4                  | 0,8403                     | $9,6 \pm 0,2$        | 0,9167                     |
| 3,0                  | 0,8056                     | $9,6 \pm 0,3$        | 0,9375                     |
| 3,6                  | 0,7778                     | $12,4 \pm 0,3$       | 0,9375                     |
| 4,2                  | 0,7500                     | $15,8 \pm 0,1$       | 0,9028                     |
| 4,8                  | 0,7222                     |                      |                            |
| SI – RC20            |                            | SI – RC40            |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                     | 0,0                  | 1,0000                     |
| $3,3 \pm 0,1$        | 0,9424                     | $3,7 \pm 0,3$        | 0,9352                     |
| $6,7 \pm 0,2$        | 0,9280                     | $6,5 \pm 0,0$        | 0,9352                     |
| $7,1 \pm 0,1$        | 0,9712                     | $6,8 \pm 0,2$        | 0,9568                     |
| $10,0 \pm 0,2$       | 0,8777                     | $10,3 \pm 0,3$       | 0,8777                     |
| $10,4 \pm 0,2$       | 0,9137                     | $10,5 \pm 0,6$       | 0,9065                     |
| $13,7 \pm 0,3$       | 0,8849                     | $13,3 \pm 0,2$       | 0,8993                     |
| $17,0 \pm 0,2$       | 0,8561                     | $17,0 \pm 0,6$       | 0,8489                     |

| POLIÉSTER (UP)       |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | UP                   |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                     | 0,0                  | 1,0000                     |
| 0,6                  | 0,9514                     | $4,1 \pm 0,1$        | 0,9653                     |
| 1,2                  | 0,9167                     | $4,4 \pm 0,1$        | 0,9653                     |
| 1,8                  | 0,8750                     | $4,8 \pm 0,2$        | 0,9722                     |
| 2,4                  | 0,8403                     | $8,5 \pm 0,3$        | 0,9305                     |
| 3,0                  | 0,8056                     | $9,0 \pm 0,2$        | 0,9375                     |
| 3,6                  | 0,7778                     | $9,2 \pm 0,2$        | 0,9375                     |
| 4,2                  | 0,7500                     | $13,3 \pm 0,4$       | 0,9028                     |
| 4,8                  | 0,7222                     |                      |                            |



| UP – RC20            |                                     | UP – RC40            |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              | 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,9 ± 0,1            | 0,9712                              | 3,0 ± 0,1            | 0,9496                              |
| 4,3 ± 0,2            | 0,9640                              | 5,4 ± 0,1            | 0,9640                              |
| 5,0 ± 0,1            | 0,9712                              | 5,6 ± 0,2            | 0,9496                              |
| 8,2 ± 0,2            | 0,9352                              | 8,4 ± 0,2            | 0,9137                              |
| 8,9 ± 0,2            | 0,9352                              | 8,7 ± 0,2            | 0,8921                              |
| 9,2 ± 0,2            | 0,9209                              | 11,0 ± 0,3           | 0,9209                              |
| 13,1 ± 0,3           | 0,8921                              | 14,0 ± 0,3           | 0,8633                              |

Obs.: Os valores do Índice de Atenuação são resultado de três medições de atenuação feitas no eletrômetro sem variação na leitura. Durante as medições não houve variação de temperatura e pressão na sala.

Analisando-se as curvas de atenuação para os compósitos poliméricos com 40 % e 20 % de resíduo, função dos fatores de atenuação para cada espessura, pode-se constatar que quanto maior for o teor de resíduo de chumbo adicionado ao polímero, menor será o Índice de Atenuação, o que corresponde a um aumento da atenuação dos compósitos quando expostos à radiação gama. Quando comparados com a curva do chumbo sólido (referência), os compósitos com 40% de resíduo de chumbo são os que têm melhor desempenho.

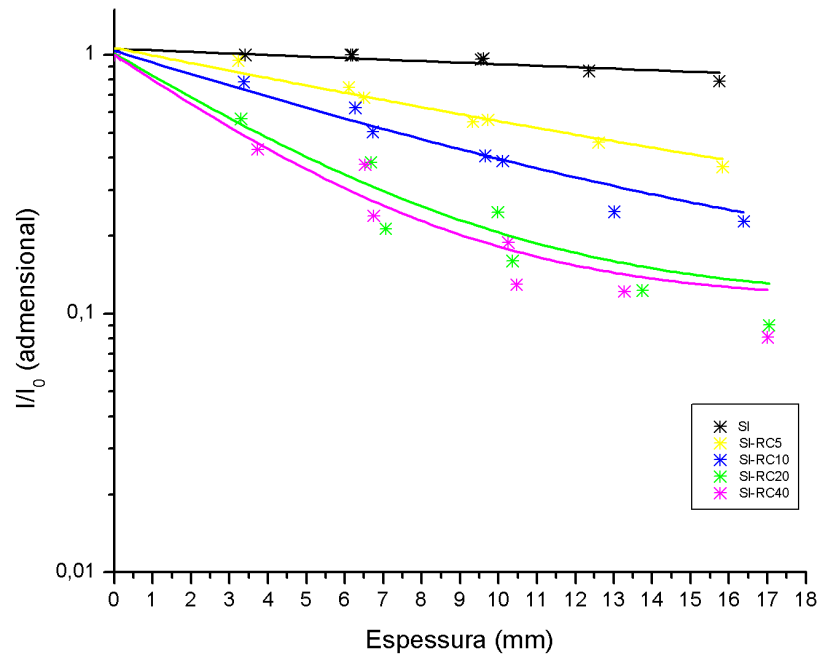
Tomando-se por base um fator de atenuação igual a 0,90 (adimensional) para os dois compósitos poliméricos, pode-se observar que para o silicone branco + resíduo de chumbo tem-se a relação: 1,40 mm de chumbo sólido  $\approx$  10,60 mm para 40% RC  $\approx$  10,90 mm para 20% RC e para o poliéster + resíduo de chumbo a relação: 1,40 mm de chumbo sólido  $\approx$  10,30 mm para 40% RC  $\approx$  11,90 mm para 20% RC.

#### 4.9.1.3 Escolha do Melhor Compósito a partir da Irradiação com Raios X por meio de Imagens Radiográficas

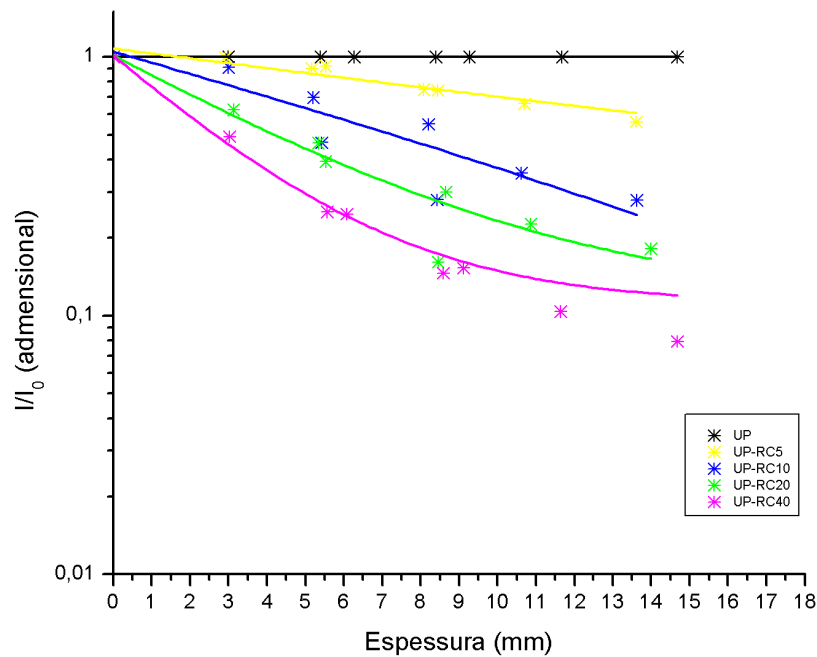
A análise do comportamento das curvas de atenuação provenientes da exposição com raios x, obtidas por meio de imagens radiográficas, possibilitou a escolha de compósitos mais eficientes a serem desenvolvidos, de acordo com o Índice de Atenuação.

Nas Figuras 4.35 e 4.36 estão mostradas as curvas de atenuação para os diversos compósitos. Os gráficos apresentados mostram o Índice de Atenuação

(adimensional) em relação à espessura do compósito (mm). A função do gráfico é exponencial decrescente.



**FIGURA 4.35** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (100 kV – 1 mA).



**FIGURA 4.36** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (100 kV – 1 mA).

Os resultados do Índice de Atenuação, como função das espessuras (x) das placas poliméricas de silicone e poliéster, são apresentados na Tabela 4.14.

**TABELA 4.14-** Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X por meio de imagens radiográficas, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) - (100kV – 1mA).

| SILICONE BRANCO (SI) |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| SI                   |                            | SI – RC5             |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                     | 0,0                  | 1,0000                     |
| 3,4 ± 0,3            | 0,9991                     | 3,2 ± 0,2            | 0,9520                     |
| 6,2 ± 0,1            | 0,9997                     | 6,1 ± 0,2            | 0,7456                     |
| 6,2 ± 0,2            | 0,9991                     | 6,5 ± 0,2            | 0,6811                     |
| 9,6 ± 0,2            | 0,9605                     | 9,3 ± 0,5            | 0,5507                     |
| 9,6 ± 0,3            | 0,9683                     | 9,7 ± 0,3            | 0,5596                     |
| 12,4 ± 0,3           | 0,8656                     | 12,6 ± 0,4           | 0,4577                     |
| 15,8 ± 0,1           | 0,7892                     | 15,8 ± 0,6           | 0,3692                     |
| SI – RC10            |                            | SI – RC20            |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                     | 0,0                  | 1,0000                     |
| 3,4 ± 0,1            | 0,7830                     | 3,3 ± 0,1            | 0,5650                     |
| 6,3 ± 0,2            | 0,6221                     | 6,7 ± 0,2            | 0,3836                     |
| 6,7 ± 0,2            | 0,5030                     | 7,1 ± 0,1            | 0,2130                     |
| 9,7 ± 0,3            | 0,4070                     | 10,0 ± 0,2           | 0,2469                     |
| 10,1 ± 0,3           | 0,3881                     | 10,4 ± 0,2           | 0,1595                     |
| 13,0 ± 0,4           | 0,2472                     | 13,7 ± 0,3           | 0,1225                     |
| 16,4 ± 0,4           | 0,2276                     | 17,0 ± 0,2           | 0,0902                     |
| SI – RC40            |                            |                      |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |                      |                            |
| 0,0                  | 1,0000                     |                      |                            |
| 3,7 ± 0,3            | 0,4316                     |                      |                            |
| 6,5 ± 0,0            | 0,3761                     |                      |                            |
| 6,8 ± 0,2            | 0,2390                     |                      |                            |
| 10,3 ± 0,3           | 0,1881                     |                      |                            |
| 10,5 ± 0,6           | 0,1292                     |                      |                            |
| 13,3 ± 0,2           | 0,1219                     |                      |                            |
| 17,0 ± 0,6           | 0,0812                     |                      |                            |

| POLIÉSTER (UP)       |                                     |                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| UP                   |                                     | UP – RC5             |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              | 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,0 ± 0,3            | 0,9998                              | 2,9 ± 0,1            | 0,9955                              |
| 5,4 ± 0,2            | 0,9998                              | 5,2 ± 0,3            | 0,8910                              |
| 6,3 ± 0,4            | 0,9992                              | 5,5 ± 0,2            | 0,9191                              |
| 8,4 ± 0,5            | 0,9991                              | 8,1 ± 0,3            | 0,7454                              |
| 9,3 ± 0,8            | 0,9998                              | 8,4 ± 0,4            | 0,7412                              |
| 11,7 ± 0,8           | 0,9992                              | 10,7 ± 0,6           | 0,6572                              |
| 14,7 ± 1,0           | 0,9993                              | 13,6 ± 0,6           | 0,5593                              |
| UP – RC10            |                                     | UP – RC20            |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000                              | 0,0                  | 1,0000                              |
| 3,0 ± 0,3            | 0,9098                              | 3,1 ± 0,3            | 0,6224                              |
| 5,2 ± 0,3            | 0,6961                              | 5,3 ± 0,3            | 0,4646                              |
| 5,4 ± 0,3            | 0,4654                              | 5,5 ± 0,3            | 0,3935                              |
| 8,2 ± 0,7            | 0,5485                              | 8,5 ± 0,2            | 0,1611                              |
| 8,4 ± 0,5            | 0,2799                              | 8,7 ± 0,3            | 0,3005                              |
| 10,6 ± 0,4           | 0,3550                              | 10,9 ± 0,5           | 0,2254                              |
| 13,6 ± 0,8           | 0,2790                              | 14,0 ± 0,2           | 0,1810                              |
| UP – RC40            |                                     |                      |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |                      |                                     |
| 0,0                  | 1,0000                              |                      |                                     |
| 3,0 ± 0,3            | 0,4914                              |                      |                                     |
| 5,6 ± 0,2            | 0,2521                              |                      |                                     |
| 6,1 ± 0,3            | 0,2470                              |                      |                                     |
| 8,6 ± 0,6            | 0,1455                              |                      |                                     |
| 9,1 ± 0,4            | 0,1526                              |                      |                                     |
| 11,7 ± 0,2           | 0,1039                              |                      |                                     |
| 14,7 ± 0,4           | 0,0794                              |                      |                                     |

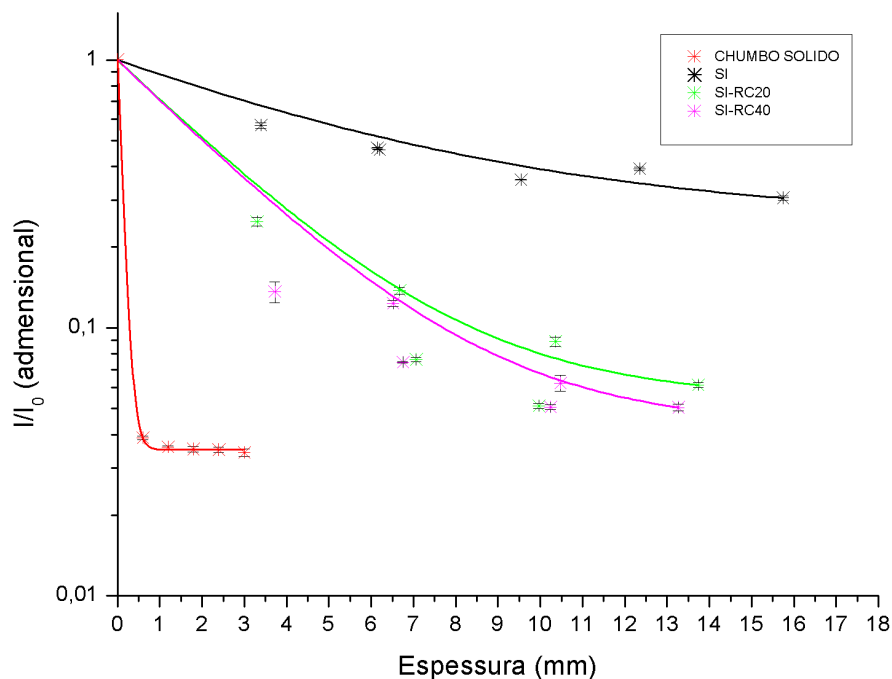
Obs.: Os valores do Índice de Atenuação são resultado de *uma área de exposição* (imagem radiográfica), em relação ao número de *pixels*.

Analisando-se as curvas de atenuação, pode-se constatar, também, que quanto maior for o teor de resíduo de chumbo adicionado ao polímero, menor será o Índice de Atenuação, o que corresponde a um aumento da atenuação dos compósitos quando expostos à radiação X. Os compósitos que apresentam melhor desempenho são os confeccionados com 40% e 20% de resíduo de chumbo, sendo os primeiros mais eficientes para proteção da radiação X.

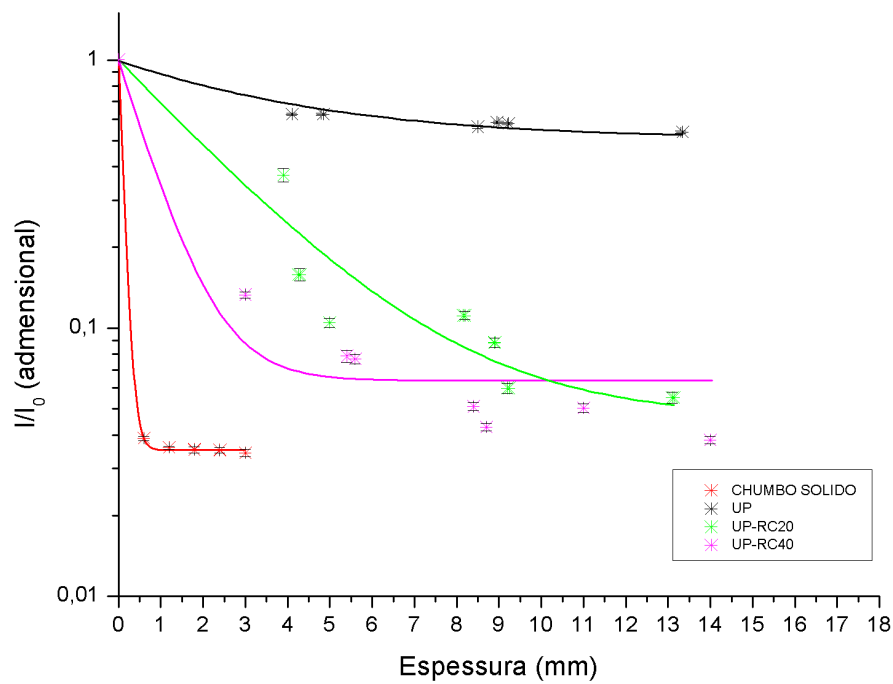
#### 4.9.1.4 Determinação dos Fatores de Atenuação para os Melhores Compósitos a partir da Irradiação com Raios X por meio de Imagens Radiográficas

Após a análise do comportamento das curvas de atenuação, provenientes da exposição com raios x para as diversas formulações, optaram-se pelos compósitos mais eficientes a serem desenvolvidos. Para os resultados finais, o equipamento de raios X foi ajustado para 70 kV com corrente de exposição de 1 mA para obter resultados mais satisfatórios na câmara CCD (imagens radiográficas com mais resolução para todas as espessuras).

As Figuras 4.37 e 4.38 apresentam as curvas de atenuação para os diversos compósitos poliméricos. Os gráficos apresentados mostram o Índice de Atenuação (adimensional) em relação à espessura do compósito (mm). A função do gráfico é exponencial decrescente.



**FIGURA 4.37** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (compósito selecionado – 70 kV – 1 mA).



**FIGURA 4.38** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (compósito selecionado – 70 kV – 1 mA).

Os resultados do Índice de Atenuação, como função das espessuras (x) das placas poliméricas de silicone e poliéster selecionados, são apresentados na Tabela 4.15.

**TABELA 4.15-** Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X por meio de imagens radiográficas, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados - (70kV – 1mA).

| SILICONE BRANCO (SI) |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | SI                   |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000            | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000            |
| 0,6                  | 0,0388 ± 0,0007            | 3,4 ± 0,3            | 0,5698 ± 0,0135            |
| 1,2                  | 0,0359 ± 0,0005            | 6,2 ± 0,1            | 0,4615 ± 0,0036            |
| 1,8                  | 0,0352 ± 0,0009            | 6,2 ± 0,2            | 0,4686 ± 0,0004            |
| 2,4                  | 0,0351 ± 0,0009            | 9,6 ± 0,2            | 0,3571 ± 0,0005            |
| 3,0                  | 0,0343 ± 0,0011            | 9,6 ± 0,3            | 0,3923 ± 0,0057            |
|                      |                            | 12,4 ± 0,3           | 0,3053 ± 0,0052            |

| SI – RC20  |                                     | SI – RC40            |                                     |
|------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
|            | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0        | 1,0000 ± 0,0000                     | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 3,3 ± 0,1  | 0,2495 ± 0,0095                     | 3,7 ± 0,3            | 0,1364 ± 0,0123                     |
| 6,7 ± 0,2  | 0,0762 ± 0,0015                     | 6,5 ± 0,0            | 0,1232 ± 0,0032                     |
| 7,1 ± 0,1  | 0,1378 ± 0,0041                     | 6,8 ± 0,2            | 0,0744 ± 0,0006                     |
| 10,0 ± 0,2 | 0,0512 ± 0,0011                     | 10,3 ± 0,3           | 0,0506 ± 0,0011                     |
| 10,4 ± 0,2 | 0,0888 ± 0,0036                     | 10,5 ± 0,6           | 0,0622 ± 0,0042                     |
| 13,7 ± 0,3 | 0,0612 ± 0,0013                     | 13,3 ± 0,2           | 0,0505 ± 0,0015                     |
| 17,0 ± 0,2 | 0,0484 ± 0,0007                     | 17,0 ± 0,6           | 0,0433 ± 0,0012                     |

## POLIÉSTER (UP)

| CHUMBO SÓLIDO        |                                     | UP                   |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 0,6                  | 0,0388 ± 0,0007                     | 4,1 ± 0,1            | 0,6280 ± 0,0071                     |
| 1,2                  | 0,0359 ± 0,0005                     | 4,8 ± 0,2            | 0,6266 ± 0,0057                     |
| 1,8                  | 0,0352 ± 0,0009                     | 8,5 ± 0,3            | 0,5624 ± 0,0062                     |
| 2,4                  | 0,0351 ± 0,0009                     | 9,0 ± 0,2            | 0,5848 ± 0,0053                     |
| 3,0                  | 0,0343 ± 0,0011                     | 9,2 ± 0,2            | 0,5787 ± 0,0051                     |
|                      |                                     | 13,3 ± 0,4           | 0,5376 ± 0,0045                     |
| UP – RC20            |                                     | UP – RC40            |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 3,9 ± 0,1            | 0,3718 ± 0,0210                     | 3,0 ± 0,1            | 0,1332 ± 0,0035                     |
| 4,3 ± 0,2            | 0,1582 ± 0,0084                     | 5,4 ± 0,1            | 0,0786 ± 0,0040                     |
| 5,0 ± 0,1            | 0,1048 ± 0,0042                     | 5,6 ± 0,2            | 0,0766 ± 0,0029                     |
| 8,2 ± 0,2            | 0,1113 ± 0,0038                     | 8,4 ± 0,2            | 0,0510 ± 0,0018                     |
| 8,9 ± 0,2            | 0,0883 ± 0,0034                     | 8,7 ± 0,2            | 0,0428 ± 0,0013                     |
| 9,2 ± 0,2            | 0,0597 ± 0,0025                     | 11,0 ± 0,3           | 0,0504 ± 0,0019                     |
| 13,1 ± 0,3           | 0,0551 ± 0,0026                     | 14,0 ± 0,3           | 0,0382 ± 0,0012                     |

Obs.: As incertezas apresentadas correspondem ao desvio padrão da média de cinco medições de áreas de expostas obtidas na imagem radiográfica, em relação ao número de pixels (leitura de tons de cinza).

Observando-se as curvas de atenuação para os compósitos poliméricos com 40% e 20% de resíduo, função dos fatores de atenuação para cada espessura, pode-se constatar que quanto maior for o teor de resíduo de chumbo adicionado ao polímero, menor será o Índice de Atenuação, o que corresponde a um aumento da atenuação dos compósitos quando expostos à radiação X. Quando comparados com

a curva do chumbo sólido (referência), os compósitos com 40 % de resíduo de chumbo são os que têm melhor desempenho para proteção radiológica.

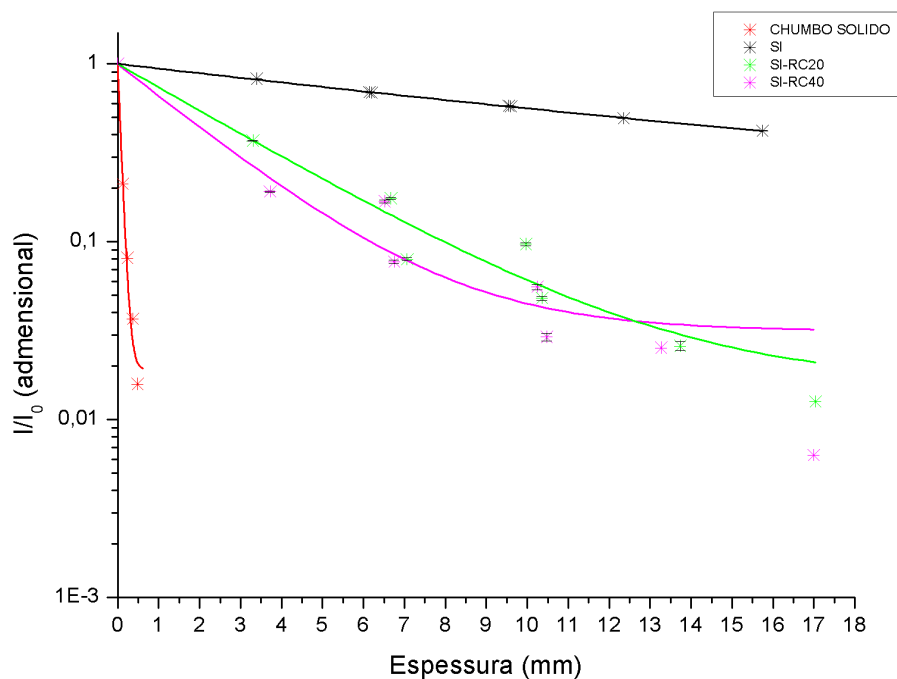
Adotando-se um fator de atenuação igual a 0,10 (adimensional) para os dois compósitos poliméricos, pode-se observar que para o silicone branco + resíduo de chumbo tem-se a relação: 0,30 mm de chumbo sólido  $\approx$  7,80 mm para 40% RC  $\approx$  8,50 mm para 20% RC e para o poliéster + resíduo de chumbo a relação: 0,30 mm de chumbo sólido  $\approx$  4,70 mm para 40% RC  $\approx$  8,00 mm para 20 % RC. Percebe-se que o compósito polimérico feito com poliéster + 40 % RC é o mais eficiente para a blindagem de raios X.

#### 4.9.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ATENUAÇÃO POR MEIO DA IRRADIAÇÃO DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E REVESTIMENTOS METÁLICOS COM RAIOS X – ETAPA FINAL

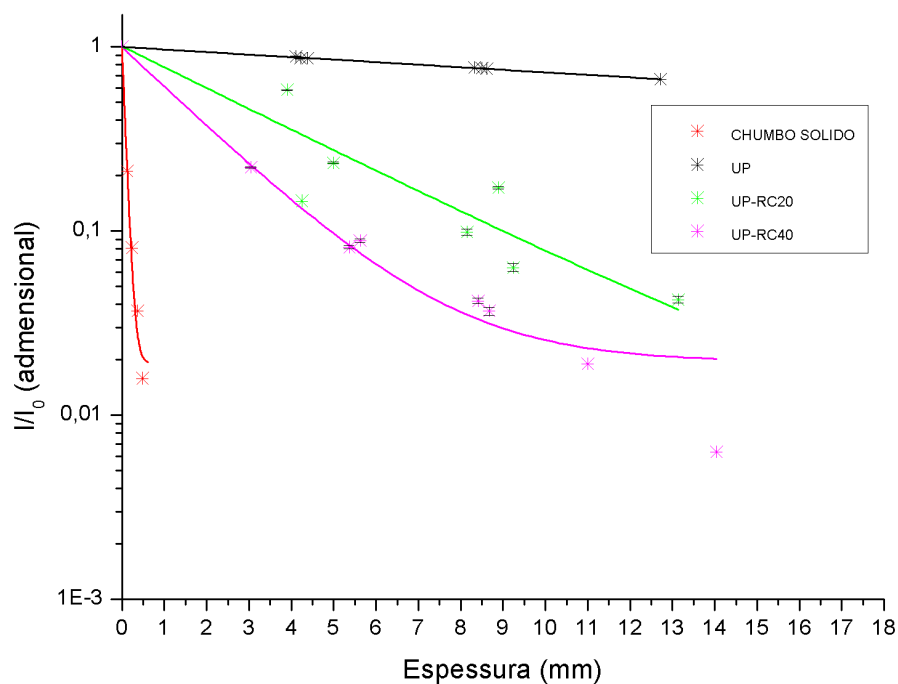
Após escolha prévia das formulações que apresentaram melhor desempenho em relação à atenuação à radiação gama quanto à radiação X, os compósitos selecionados foram expostos à radiação X, utilizando-se o arranjo experimental apresentado na Figura 3.15.

As Figuras 4.39 a 4.41 apresentam as curvas de atenuação para os diversos compósitos poliméricos e revestimentos metálicos. Os gráficos apresentados mostram o Índice de Atenuação (adimensional) em relação à espessura do compósito (mm) para a tensão de 80 kV, corrente de 40 mA e filtração correspondente a 0,15 mm Cu. A função do gráfico é exponencial decrescente.

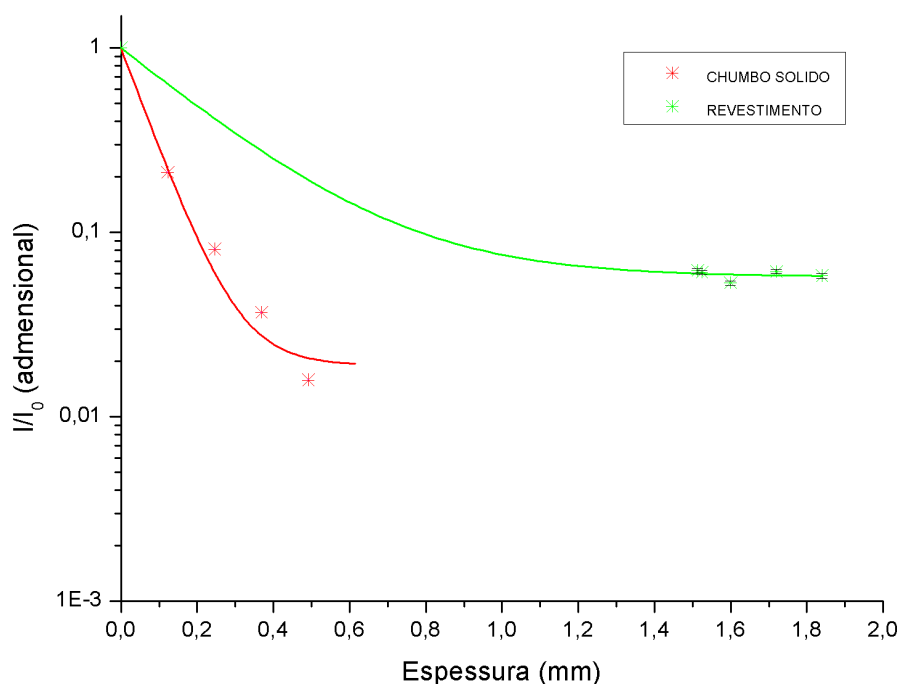




**FIGURA 4.39** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (80 kV – 40 mA – 0,15 mm Cu).



**FIGURA 4.40** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (80 kV – 40 mA – 0,15 mm Cu).



**FIGURA 4.41** – Curvas de atenuação para os corpos de prova metálicos feitos com aço carbono e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (80 kV – 40 mA - 0,15 mm Cu).

Índice de Atenuação, como função das espessuras ( $x$ ) das placas poliméricas de silicone e poliéster e dos revestimentos metálicos, são apresentados na Tabela 4.16.

**TABELA 4.16-** Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados - (80kV – 40mA - 0,15mmCu).

| SILICONE BRANCO (SI) |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | SI                   |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,000                | $1,0000 \pm 0,0022$        | 0,0                  | $1,0000 \pm 0,0000$        |
| 0,123                | $0,2114 \pm 0,0014$        | $3,4 \pm 0,3$        | $0,8228 \pm 0,0039$        |
| 0,246                | $0,0810 \pm 0,0028$        | $6,2 \pm 0,1$        | $0,6937 \pm 0,0035$        |
| 0,369                | $0,0367 \pm 0,0017$        | $6,2 \pm 0,2$        | $0,6867 \pm 0,0000$        |
| 0,492                | $0,0158 \pm 0,0000$        | $9,6 \pm 0,2$        | $0,5813 \pm 0,0014$        |
| 0,615                | $0,0032 \pm 0,0000$        | $9,6 \pm 0,3$        | $0,5766 \pm 0,0034$        |
|                      |                            | $12,4 \pm 0,3$       | $0,4943 \pm 0,0026$        |
|                      |                            | $15,8 \pm 0,1$       | $0,4202 \pm 0,0020$        |

| SI – RC20            |                                     | SI – RC40            |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 3,3 ± 0,1            | 0,3697 ± 0,0012                     | 3,7 ± 0,3            | 0,1918 ± 0,0017                     |
| 6,7 ± 0,2            | 0,1753 ± 0,0017                     | 6,5 ± 0,0            | 0,1683 ± 0,0035                     |
| 7,1 ± 0,1            | 0,0797 ± 0,0014                     | 6,8 ± 0,2            | 0,0772 ± 0,0017                     |
| 10,0 ± 0,2           | 0,0968 ± 0,0017                     | 10,3 ± 0,3           | 0,0557 ± 0,0017                     |
| 10,4 ± 0,2           | 0,0481 ± 0,0014                     | 10,5 ± 0,6           | 0,0291 ± 0,0014                     |
| 13,7 ± 0,3           | 0,0260 ± 0,0014                     | 13,3 ± 0,2           | 0,0253 ± 0,0000                     |
| 17,0 ± 0,2           | 0,0127 ± 0,0000                     | 17,0 ± 0,6           | 0,0063 ± 0,0000                     |

### POLIÉSTER (UP)

| CHUMBO SÓLIDO        |                                     | UP                   |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) |                                     |
| 0,000                | 1,0000 ± 0,0022                     | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 0,123                | 0,2114 ± 0,0014                     | 4,1 ± 0,1            | 0,8873 ± 0,0048                     |
| 0,246                | 0,0810 ± 0,0028                     | 4,2 ± 0,1            | 0,8658 ± 0,0028                     |
| 0,369                | 0,0367 ± 0,0017                     | 4,4 ± 0,2            | 0,8671 ± 0,0032                     |
| 0,492                | 0,0158 ± 0,0000                     | 8,3 ± 0,1            | 0,7696 ± 0,0035                     |
| 0,615                | 0,0032 ± 0,0000                     | 8,5 ± 0,1            | 0,7665 ± 0,0026                     |
|                      |                                     | 8,6 ± 0,2            | 0,7601 ± 0,0014                     |
|                      |                                     | 12,7 ± 0,3           | 0,6671 ± 0,0014                     |
| UP – RC20            |                                     | UP – RC40            |                                     |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) |                                     | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 3,9 ± 0,1            | 0,5835 ± 0,0026                     | 3,0 ± 0,1            | 0,2215 ± 0,0022                     |
| 4,3 ± 0,2            | 0,1456 ± 0,0000                     | 5,4 ± 0,1            | 0,0816 ± 0,0014                     |
| 5,0 ± 0,1            | 0,2342 ± 0,0022                     | 5,6 ± 0,2            | 0,0886 ± 0,0022                     |
| 8,2 ± 0,2            | 0,0987 ± 0,0035                     | 8,4 ± 0,2            | 0,0418 ± 0,0014                     |
| 8,9 ± 0,2            | 0,1721 ± 0,0028                     | 8,7 ± 0,2            | 0,0367 ± 0,0017                     |
| 9,2 ± 0,2            | 0,0633 ± 0,0032                     | 11,0 ± 0,3           | 0,0190 ± 0,0000                     |
| 13,1 ± 0,3           | 0,0424 ± 0,0017                     | 14,0 ± 0,3           | 0,0063 ± 0,0000                     |

### ASPERSÃO TÉRMICA

| CHUMBO SÓLIDO        |                                     | REVESTIMENTO         |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = I/I <sub>0</sub> (adimensional) |
| 0,000                | 1,0000 ± 0,0022                     | 0,00                 | 1,0000 ± 0,0000                     |
| 0,123                | 0,2114 ± 0,0014                     | 1,51                 | 0,0620 ± 0,0017                     |
| 0,246                | 0,0810 ± 0,0028                     | 1,52                 | 0,0608 ± 0,0014                     |
| 0,369                | 0,0367 ± 0,0017                     | 1,60                 | 0,0532 ± 0,0014                     |
| 0,492                | 0,0158 ± 0,0000                     | 1,72                 | 0,0614 ± 0,0017                     |
| 0,615                | 0,0032 ± 0,0000                     | 1,84                 | 0,0582 ± 0,0017                     |

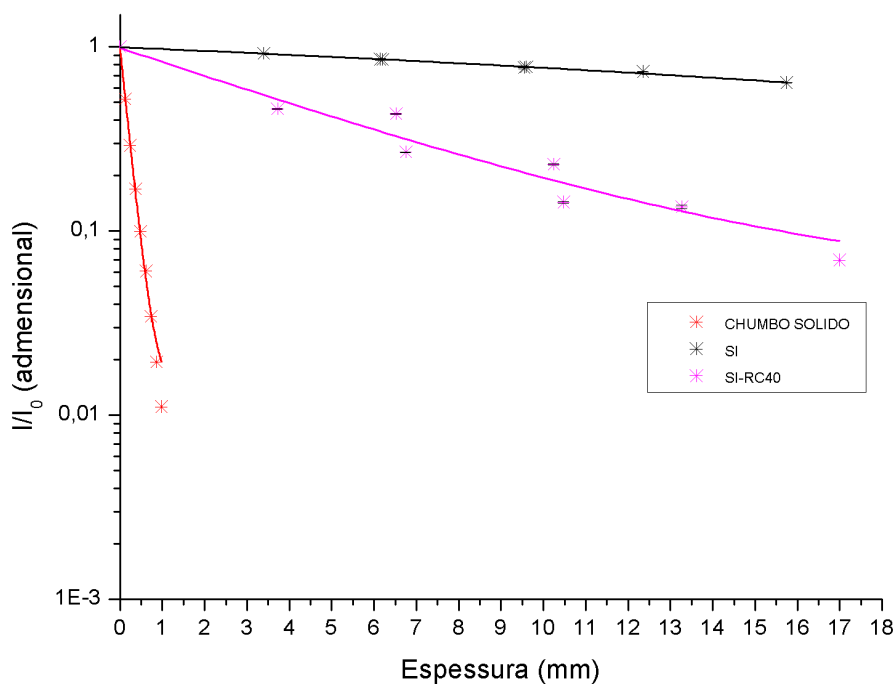
Obs.: As incertezas apresentadas correspondem ao desvio padrão da média de cinco medições em cada posição no corpo de prova.

Observando-se as curvas de atenuação para os compósitos poliméricos com 40% e 20% de resíduo de chumbo, função dos fatores de atenuação para cada espessura, pode-se constatar que quanto maior for o teor de resíduo de chumbo adicionado ao polímero, menor será o Índice de Atenuação, o que corresponde a um aumento da atenuação dos compósitos quando expostos à radiação X. Quando comparados com a curva do chumbo sólido (referência), os compósitos com 40% de resíduo de chumbo são os que têm melhor desempenho para proteção radiológica.

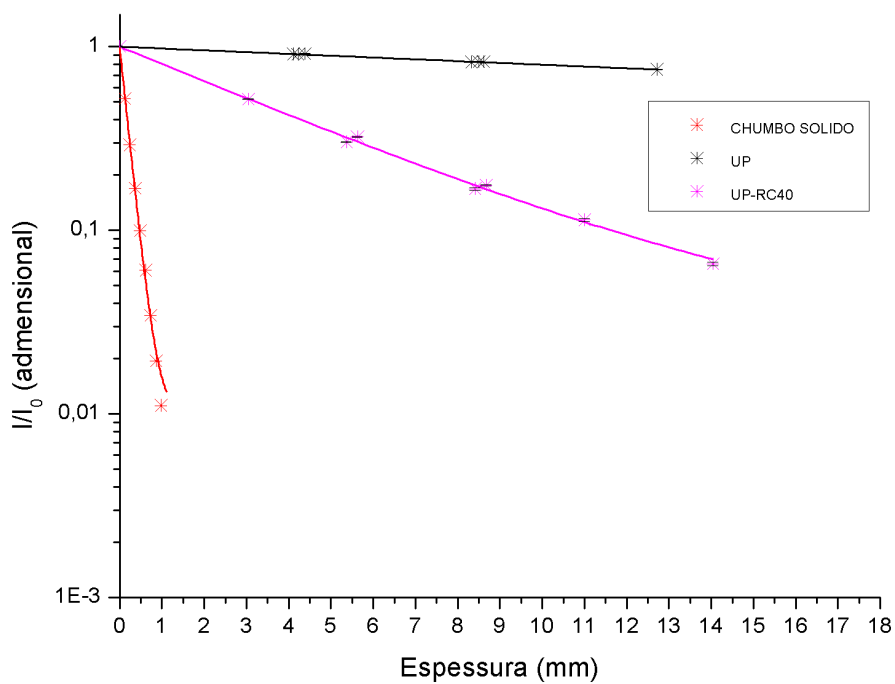
Adotando-se um fator de atenuação igual a 0,10 (adimensional) para os dois compósitos poliméricos expostos à radiação X (*80 kV – 40 mA - 0,15 mm Cu*), pode-se observar que para o silicone branco + resíduo de chumbo tem-se a relação: 0,20 mm de chumbo sólido  $\approx$  6,40 mm para 40% RC  $\approx$  8,20 mm para 20% RC e para o poliéster + resíduo de chumbo a relação: 0,20 mm de chumbo sólido  $\approx$  5,00 mm para 40% RC  $\approx$  9,20 mm para 20% RC. Percebe-se que o compósito polimérico feito com poliéster + 40% RC é o mais eficiente para a blindagem de raios X.

Para os materiais metálicos, também na mesma condição de exposição, resultou na relação: 0,20 mm de chumbo sólido  $\approx$  0,80 mm para aço carbono revestido com resíduo de chumbo.

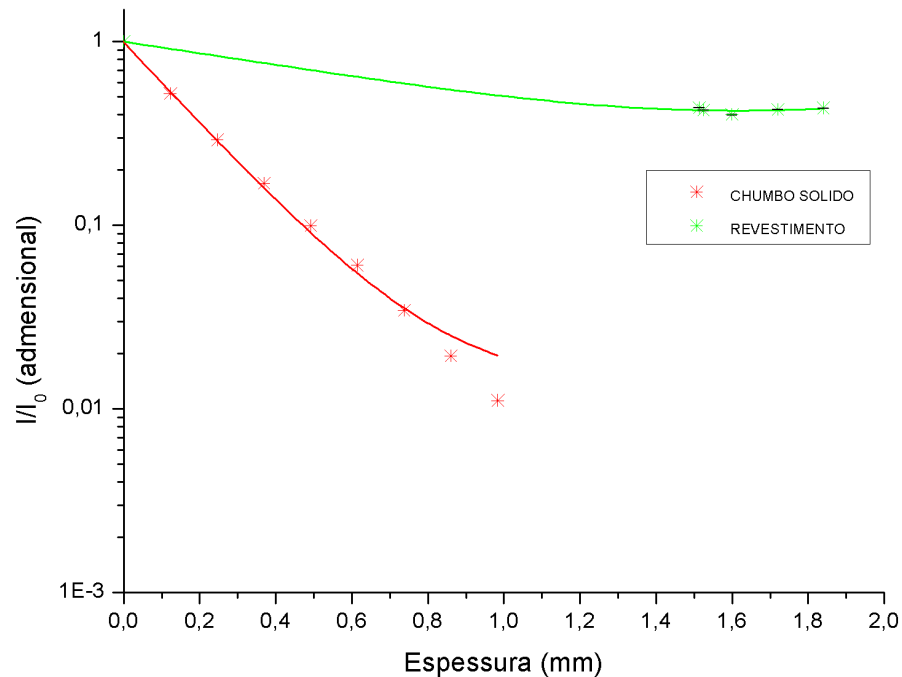
As Figuras 4.42 a 4.44 apresentam as curvas de atenuação para os diversos compósitos poliméricos e metálicos. Os gráficos apresentados mostram o Índice de Atenuação (adimensional) em relação à espessura do compósito (mm) para a tensão de 150 kV, corrente de 24 mA e filtração correspondente a 0,7 mm Cu. A função do gráfico é exponencial decrescente.



**FIGURA 4.42** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com SI e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu).



**FIGURA 4.43** – Curvas de atenuação para os compósitos poliméricos feitos com UP e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu).



**FIGURA 4.44** – Curvas de atenuação para os materiais metálicos feitos com aço carbono e RC e fatores de atenuação experimentais, a partir da exposição de raios X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu).

Os resultados do Índice de Atenuação, como função das espessuras ( $x$ ) das placas poliméricas de silicone e poliéster e das placas metálicas, são apresentados na Tabela 4.17.

**TABELA 4.17-** Média dos valores do Índice de Atenuação ( $I/I_0$ ) para radiação X, resultantes das medições para diferentes espessuras das placas poliméricas (mm) – Compósitos selecionados - (150kV – 24mA - 0,7mmCu).

| SILICONE BRANCO (SI) |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | SI                   |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,000                | $1,0000 \pm 0,0056$        | 0,0                  | $1,0000 \pm 0,0000$        |
| 0,123                | $0,5204 \pm 0,0009$        | $3,4 \pm 0,3$        | $0,9233 \pm 0,0025$        |
| 0,246                | $0,2911 \pm 0,0016$        | $6,2 \pm 0,1$        | $0,8550 \pm 0,0066$        |
| 0,369                | $0,1694 \pm 0,0020$        | $6,2 \pm 0,2$        | $0,8539 \pm 0,0075$        |
| 0,492                | $0,0994 \pm 0,0023$        | $9,6 \pm 0,2$        | $0,7700 \pm 0,0132$        |
| 0,615                | $0,0606 \pm 0,0012$        | $9,6 \pm 0,3$        | $0,7772 \pm 0,0060$        |
| 0,738                | $0,0344 \pm 0,0015$        | $12,4 \pm 0,3$       | $0,7328 \pm 0,0030$        |
| 0,861                | $0,0194 \pm 0,0000$        | $15,8 \pm 0,1$       | $0,6394 \pm 0,0036$        |

| SI – RC40            |                            |
|----------------------|----------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000            |
| 3,7 ± 0,3            | 0,4607 ± 0,0036            |
| 6,5 ± 0,0            | 0,4331 ± 0,0019            |
| 6,8 ± 0,2            | 0,2678 ± 0,0015            |
| 10,3 ± 0,3           | 0,2300 ± 0,0023            |
| 10,5 ± 0,6           | 0,1433 ± 0,0015            |
| 13,3 ± 0,2           | 0,1356 ± 0,0030            |
| 17,0 ± 0,6           | 0,0694 ± 0,0000            |

| POLIÉSTER (UP)       |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | UP                   |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,000                | 1,0000 ± 0,0056            | 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000            |
| 0,123                | 0,5204 ± 0,0009            | 4,1 ± 0,1            | 0,9094 ± 0,0032            |
| 0,246                | 0,2911 ± 0,0016            | 4,2 ± 0,1            | 0,9039 ± 0,0058            |
| 0,369                | 0,1694 ± 0,0020            | 4,4 ± 0,2            | 0,9161 ± 0,0030            |
| 0,492                | 0,0994 ± 0,0023            | 8,3 ± 0,1            | 0,8233 ± 0,0015            |
| 0,615                | 0,0606 ± 0,0012            | 8,5 ± 0,1            | 0,8272 ± 0,0030            |
| 0,738                | 0,0344 ± 0,0015            | 8,6 ± 0,2            | 0,8244 ± 0,0036            |
| 0,861                | 0,0194 ± 0,0000            | 12,7 ± 0,3           | 0,7517 ± 0,0037            |
| 0,984                | 0,0111 ± 0,0000            |                      |                            |
| 1,107                | 0,0028 ± 0,0000            |                      |                            |

| UP- RC40             |                            |
|----------------------|----------------------------|
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | F = $I/I_0$ (adimensional) |
| 0,0                  | 1,0000 ± 0,0000            |
| 3,0 ± 0,1            | 0,5173 ± 0,0016            |
| 5,4 ± 0,1            | 0,3027 ± 0,0012            |
| 5,6 ± 0,2            | 0,3241 ± 0,0026            |
| 8,4 ± 0,2            | 0,1683 ± 0,0025            |
| 8,7 ± 0,2            | 0,1761 ± 0,0015            |
| 11,0 ± 0,3           | 0,1139 ± 0,0020            |
| 14,0 ± 0,3           | 0,0656 ± 0,0015            |

| ASPERSÃO TÉRMICA     |                            |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| CHUMBO SÓLIDO        |                            | REVESTIMENTO         |                            |
| ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) | ESPESSURA MÉDIA (mm) | $F = I/I_0$ (adimensional) |
| 0,000                | $1,0000 \pm 0,0056$        | 0,00                 | $1,0000 \pm 0,0000$        |
| 0,123                | $0,5204 \pm 0,0009$        | 1,51                 | $0,4374 \pm 0,0023$        |
| 0,246                | $0,2911 \pm 0,0016$        | 1,52                 | $0,4223 \pm 0,0026$        |
| 0,369                | $0,1694 \pm 0,0020$        | 1,60                 | $0,4019 \pm 0,0034$        |
| 0,492                | $0,0994 \pm 0,0023$        | 1,72                 | $0,4271 \pm 0,0025$        |
| 0,615                | $0,0606 \pm 0,0012$        | 1,84                 | $0,4343 \pm 0,0027$        |
| 0,738                | $0,0344 \pm 0,0015$        |                      |                            |
| 0,861                | $0,0194 \pm 0,0000$        |                      |                            |
| 0,984                | $0,0111 \pm 0,0000$        |                      |                            |
| 1,107                | $0,0028 \pm 0,0000$        |                      |                            |

Obs.: As incertezas apresentadas correspondem ao desvio padrão da média de cinco medições em cada posição no corpo de prova.

Para um fator de atenuação igual a 0,10 (adimensional) para os dois compósitos poliméricos expostos à radiação X (150 kV – 24 mA - 0,7 mm Cu), pode-se constatar que, para o silicone branco + resíduo de chumbo, tem-se a relação: 0,50 mm de chumbo sólido  $\approx$  15,50 mm para 40% RC e para o poliéster + resíduo de chumbo a relação: 0,50 mm de chumbo sólido  $\approx$  11,10 mm para 40% RC. No caso dos revestimentos metálicos, para este fator não foi possível fazer leitura, portanto, pode-se concluir que o material em questão, com esta espessura, não serve para a finalidade de proteção. Porém, se tomarmos por base um fator de atenuação igual a 0,50 (adimensional), pode-se obter as relações para o silicone branco + resíduo de chumbo: 0,15 mm de chumbo sólido  $\approx$  4,00 mm para 40% RC, poliéster + resíduo de chumbo: 0,15 mm de chumbo sólido  $\approx$  3,30 mm para 40% RC e para o aço carbono + resíduo de chumbo: 0,15 mm de chumbo sólido  $\approx$  1,00 mm.

Os valores dos fatores de atenuação referentes às curvas de atenuação, neste caso, são mais precisos por serem obtidos em um equipamento de raios X industrial, calibrado com instrumentos de medida de intensidade de radiação também calibrados. Na seção 3.10.1.3, os valores de  $I/I_0$  foram obtidos por meio da avaliação de imagens, processo para resultados mais qualitativos.

O revestimento metálico que apresentou maior equivalência de espessura em chumbo, no ensaio de raios X para 80kV e 150kV, foi o que teve o valor de rugosidade ( $R_a$ ) menor, tanto antes como após a aplicação do revestimento. Isto significa que a superfície do revestimento ficou mais plana, com pouca rugosidade.



**TABELA 4.18** – Fatores de atenuação ( $I/I_0$ ) e espessura equivalente ( $X_{eq}$ ) em chumbo para radiação X em 80 e 150 kV dos compósitos e revestimentos produzidos.

| Tensão do Tubo de Raios X: 80 kV / Corrente: 40 mA / Filtração: 0,15 mm Cu |                  |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
|--|------------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------|---------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|---------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|
| ESPESSURA<br>(mm)  | Chumbo<br>Sólido | Aço<br>Carbono |                    | Aço<br>Aspergido |                    | SI      |                    | SI – RC20 |                    | SI – RC40 |                    | UP      |                    | UP – RC20 |                    | UP – RC40 |                    |
|  | $I/I_0$          | $I/I_0$        | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$          | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$ | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$   | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$   | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$ | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$   | $X_{eqPb}$<br>(mm) | $I/I_0$   | $X_{eqPb}$<br>(mm) |
| 0,000  | 1,000            |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 0,123  | 0,211            |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 0,246  | 0,081            |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 0,369  | 0,037            |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 0,492  | 0,016            |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 0,615  | 0,003            |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 1,50   |                  | 0,073          | 0,27               |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 1,51   |                  |                |                    | 0,062            | 0,30               |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 1,53   |                  |                |                    | 0,061            | 0,30               |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 1,60   |                  |                |                    | 0,053            | 0,31               |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 1,72   |                  |                |                    | 0,061            | 0,30               |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| <b>1,84</b>  |                  |                |                    | <b>0,058</b>     | <b>0,31</b>        |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| <b>3,00</b>  |                  | <b>0,013</b>   | <b>0,52</b>        |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |
| 3,05   |                  |                |                    |                  |                    |         |                    |           |                    |           |                    |         |                    |           |                    | 0,222     | 0,12               |
| 3,30   |                  |                |                    |                  |                    |         |                    | 0,370     | 0,10               |           |                    |         |                    |           |                    |           |                    |

|      |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
|------|--|--|--|--|--|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 3,40 |  |  |  |  |  | 0,687 | 0,03 |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 3,73 |  |  |  |  |  |       |      |       |      | 0,192 | 0,14 |       |      |       |      |       |      |
| 3,90 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,584 | 0,06 |       |      |
| 4,11 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,887 | 0,02 |       |      |       |      |
| 4,22 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,866 | 0,02 |       |      |       |      |
| 4,25 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,146 | 0,19 |       |      |
| 4,39 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,867 | 0,02 |       |      |       |      |
| 5,00 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,234 | 0,12 |       |      |
| 5,37 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,082 | 0,25 |
| 5,63 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,089 | 0,24 |
| 6,15 |  |  |  |  |  | 0,694 | 0,05 |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 6,20 |  |  |  |  |  | 0,687 | 0,05 |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 6,53 |  |  |  |  |  |       |      |       |      | 0,168 | 0,16 |       |      |       |      |       |      |
| 6,68 |  |  |  |  |  |       |      | 0,175 | 0,16 |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 6,75 |  |  |  |  |  |       |      |       |      | 0,077 | 0,26 |       |      |       |      |       |      |
| 7,07 |  |  |  |  |  |       |      | 0,080 | 0,25 |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 8,15 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,099 | 0,23 |       |      |
| 8,33 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,770 | 0,04 |       |      |       |      |
| 8,42 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |       |      | 0,042 | 0,35 |
| 8,50 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,766 | 0,04 |       |      |       |      |
| 8,61 |  |  |  |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,760 | 0,04 |       |      |       |      |

|              |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             |
|--------------|--|--|--|--|--|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 8,68         |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             | 0,037        | 0,37        |
| 8,90         |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             | 0,172        | 0,16        |              |             |
| 9,25         |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             | 0,063        | 0,30        |              |             |
| 9,55         |  |  |  |  |  | 0,581        | 0,07        |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             |
| 9,60         |  |  |  |  |  | 0,577        | 0,07        |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             |
| 9,98         |  |  |  |  |  |              |             | 0,097        | 0,23        |              |             |              |             |              |             |              |             |
| 10,25        |  |  |  |  |  |              |             |              |             | 0,056        | 0,32        |              |             |              |             |              |             |
| 10,37        |  |  |  |  |  |              |             | 0,048        | 0,34        |              |             |              |             |              |             |              |             |
| 10,48        |  |  |  |  |  |              |             |              |             | 0,029        | 0,41        |              |             |              |             |              |             |
| 11,00        |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             | 0,019        | 0,47        |
| 12,35        |  |  |  |  |  | 0,494        | 0,08        |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             |
| <b>12,72</b> |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             | <b>0,667</b> | <b>0,05</b> |              |             |              |             |
| <b>13,15</b> |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             | <b>0,042</b> | <b>0,35</b> |              |             |
| 13,28        |  |  |  |  |  |              |             |              |             | 0,025        | 0,44        |              |             |              |             |              |             |
| <b>13,74</b> |  |  |  |  |  |              |             | <b>0,026</b> | <b>0,43</b> |              |             |              |             |              |             |              |             |
| <b>14,05</b> |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             | <b>0,006</b> | <b>0,58</b> |
| <b>15,75</b> |  |  |  |  |  | <b>0,420</b> | <b>0,09</b> |              |             |              |             |              |             |              |             |              |             |
| <b>17,00</b> |  |  |  |  |  |              |             |              |             | <b>0,006</b> | <b>0,58</b> |              |             |              |             |              |             |
| 17,04        |  |  |  |  |  |              |             | 0,013        | 0,52        |              |             |              |             |              |             |              |             |

**Tensão do Tubo de Raios X: 150 kV / Corrente: 24 mA / Filtração: 0,7 mm Cu**

[illegible]

|             |  |              |             |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |
|-------------|--|--------------|-------------|--|--|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 3,05        |  |              |             |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,517 | 0,12 |
| 3,40        |  |              |             |  |  | 0,923 | 0,02 |       |      |       |      |       |      |
| 3,73        |  |              |             |  |  |       |      | 0,461 | 0,16 |       |      |       |      |
| 4,11        |  |              |             |  |  |       |      |       |      | 0,909 | 0,02 |       |      |
| 4,22        |  |              |             |  |  |       |      |       |      | 0,904 | 0,02 |       |      |
| 4,39        |  |              |             |  |  |       |      |       |      | 0,916 | 0,02 |       |      |
| 4,50        |  | 0,156        | 0,39        |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 5,37        |  |              |             |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,303 | 0,24 |
| 5,63        |  |              |             |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,324 | 0,23 |
| 6,00        |  | 0,101        | 0,49        |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 6,15        |  |              |             |  |  | 0,855 | 0,04 |       |      |       |      |       |      |
| 6,20        |  |              |             |  |  | 0,854 | 0,04 |       |      |       |      |       |      |
| 6,53        |  |              |             |  |  |       |      | 0,433 | 0,17 |       |      |       |      |
| 6,75        |  |              |             |  |  |       |      | 0,268 | 0,27 |       |      |       |      |
| <b>7,50</b> |  | <b>0,066</b> | <b>0,60</b> |  |  |       |      |       |      |       |      |       |      |
| 8,33        |  |              |             |  |  |       |      |       |      | 0,823 | 0,05 |       |      |
| 8,42        |  |              |             |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,168 | 0,37 |
| 8,50        |  |              |             |  |  |       |      |       |      | 0,827 | 0,04 |       |      |
| 8,61        |  |              |             |  |  |       |      |       |      | 0,824 | 0,05 |       |      |
| 8,68        |  |              |             |  |  |       |      |       |      |       |      | 0,176 | 0,36 |
| 9,55        |  |              |             |  |  | 0,770 | 0,06 |       |      |       |      |       |      |

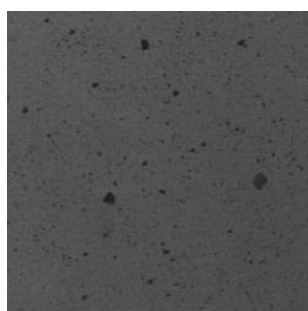
|              |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             |              |             |
|--------------|--|--|--|--|--|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 9,60         |  |  |  |  |  | 0,777        | 0,06        |              |             |              |             |              |             |
| 10,25        |  |  |  |  |  |              |             | 0,230        | 0,31        |              |             |              |             |
| 10,48        |  |  |  |  |  |              |             | 0,143        | 0,41        |              |             |              |             |
| 11,00        |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             | 0,114        | 0,47        |
| 12,35        |  |  |  |  |  | 0,733        | 0,07        |              |             |              |             |              |             |
| <b>12,72</b> |  |  |  |  |  |              |             |              |             | <b>0,752</b> | <b>0,06</b> |              |             |
| 13,28        |  |  |  |  |  |              |             | 0,136        | 0,43        |              |             |              |             |
| <b>14,05</b> |  |  |  |  |  |              |             |              |             |              |             | <b>0,068</b> | <b>0,60</b> |
| <b>15,75</b> |  |  |  |  |  | <b>0,639</b> | <b>0,09</b> |              |             |              |             |              |             |
| <b>17,00</b> |  |  |  |  |  |              |             | <b>0,069</b> | <b>0,59</b> |              |             |              |             |

Obs.: Os valores destacados em negrito apresentam os melhores resultados para as tensões de 80 kV e 150 kV.

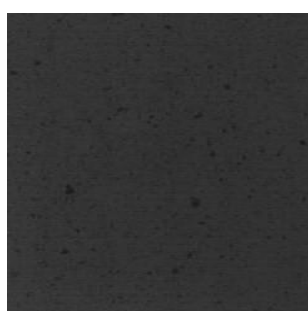
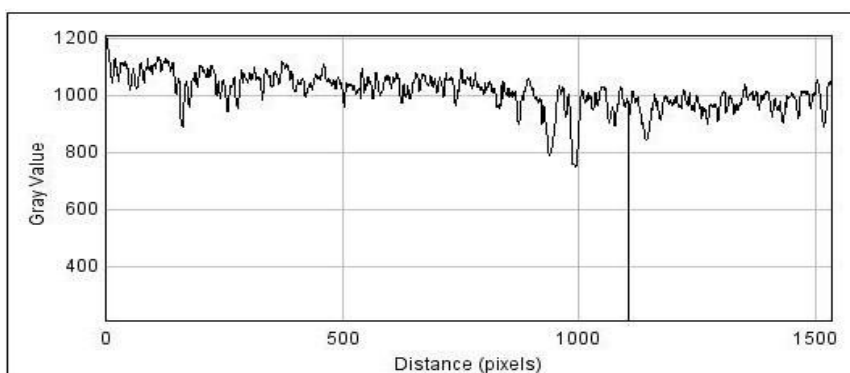
Os fatores de atenuação e os valores de espessura equivalente (de atenuação) em chumbo –  $X_{eq}$  estão apresentados na Tabela 4.18. Os melhores resultados foram obtidos para a tensão de 150 kV com filtração de 0,7 mm Cu, para todos os compósitos.

#### 4.10 AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS E REVESTIMENTOS METÁLICOS, A PARTIR DA IRRADIAÇÃO COM RAIOS X

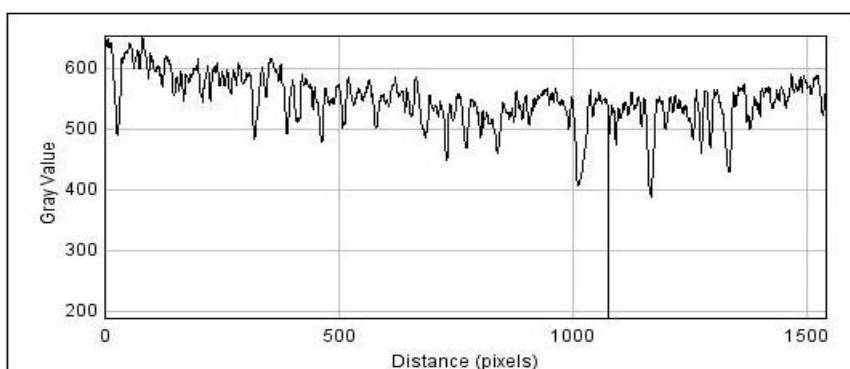
As Figuras 4.45 a 4.49 mostram as imagens radiográficas dos compósitos feitos com silicone branco + resíduo de chumbo e poliéster + resíduo de chumbo e do revestimento feito com resíduo de chumbo sobre o aço carbono, respectivamente.



SI – RC20  
 $X=3,3$  mm

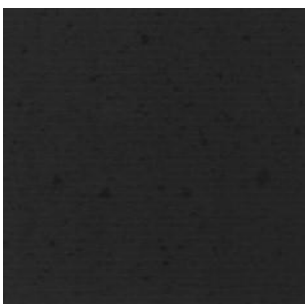
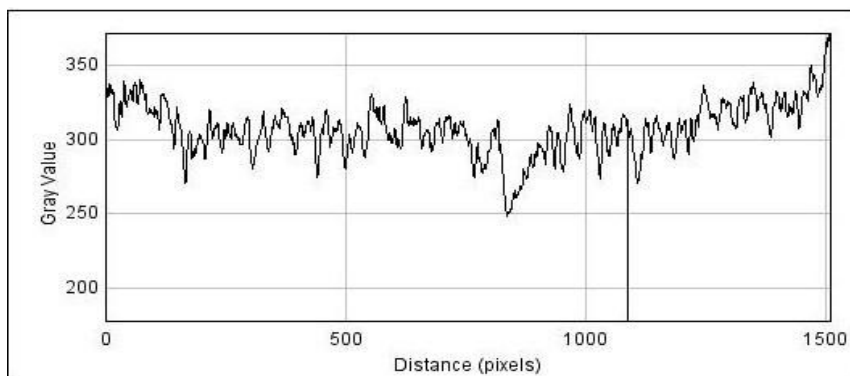


SI – RC20  
 $X=6,7$  mm

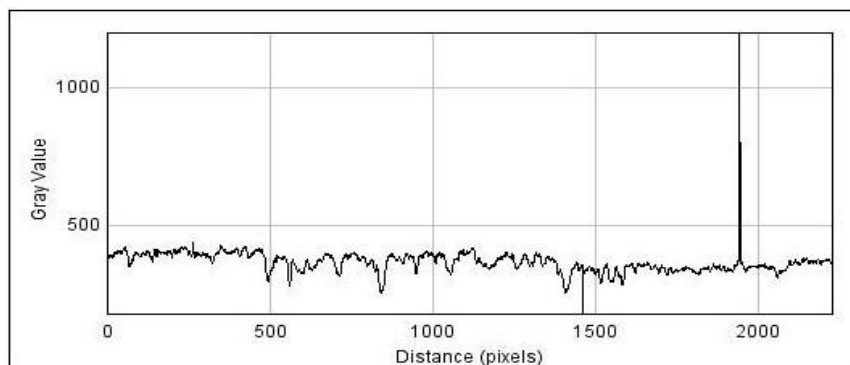




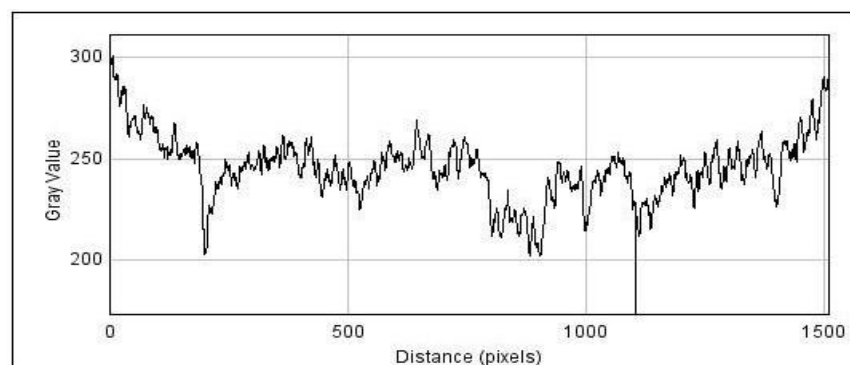
SI – RC20  
X=7,1 mm



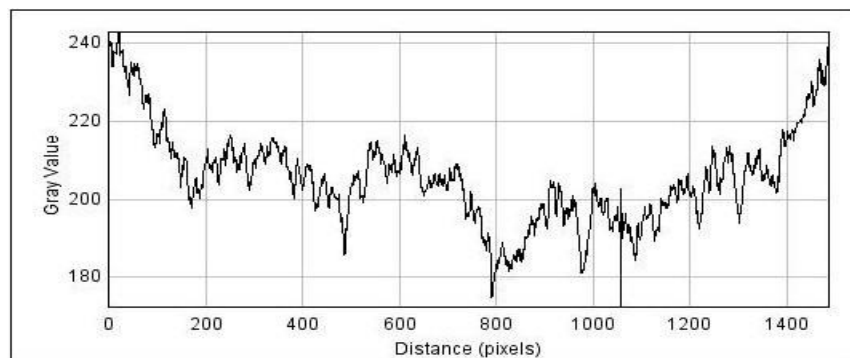
SI – RC20  
X=10,0 mm



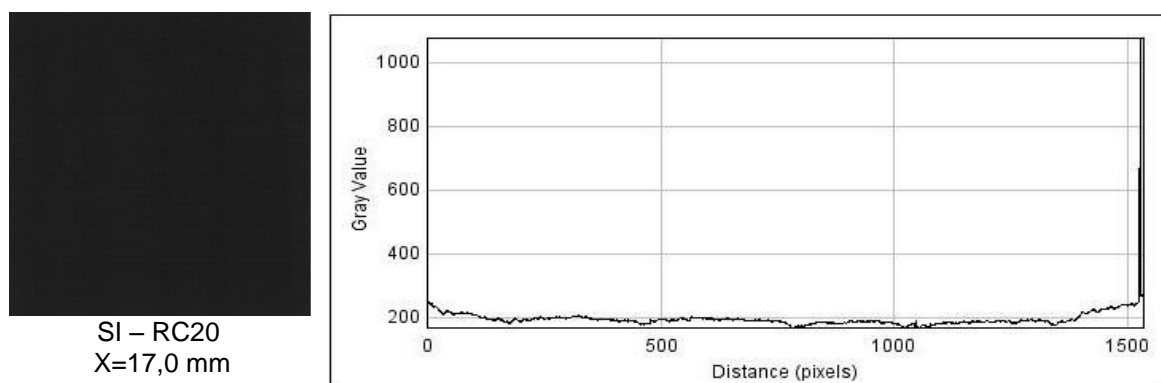
SI – RC20  
X=10,4 mm



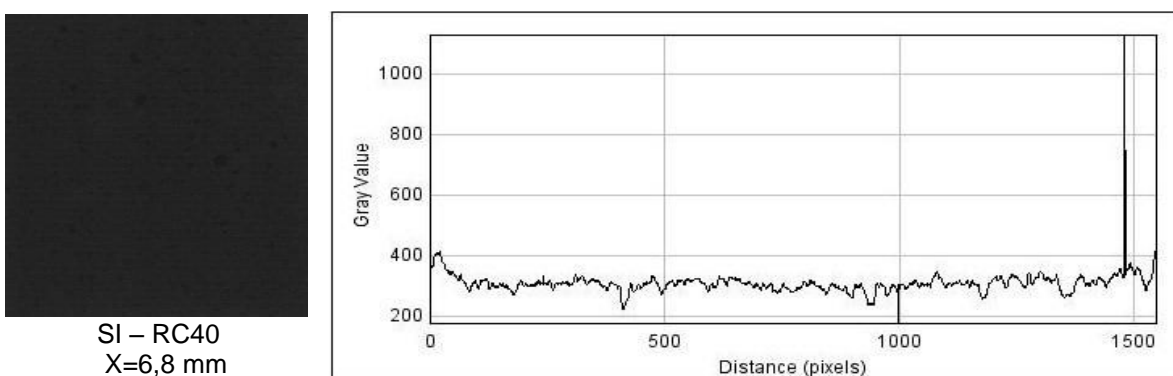
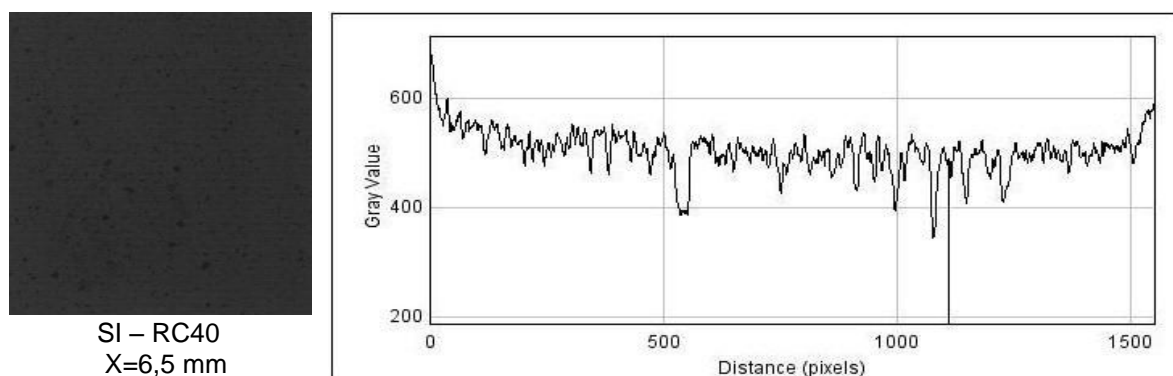
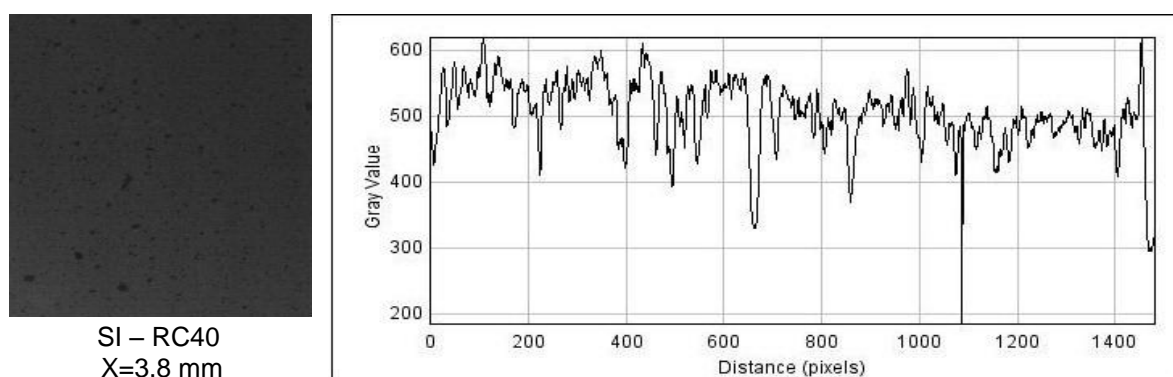
SI – RC20  
X=13,7 mm

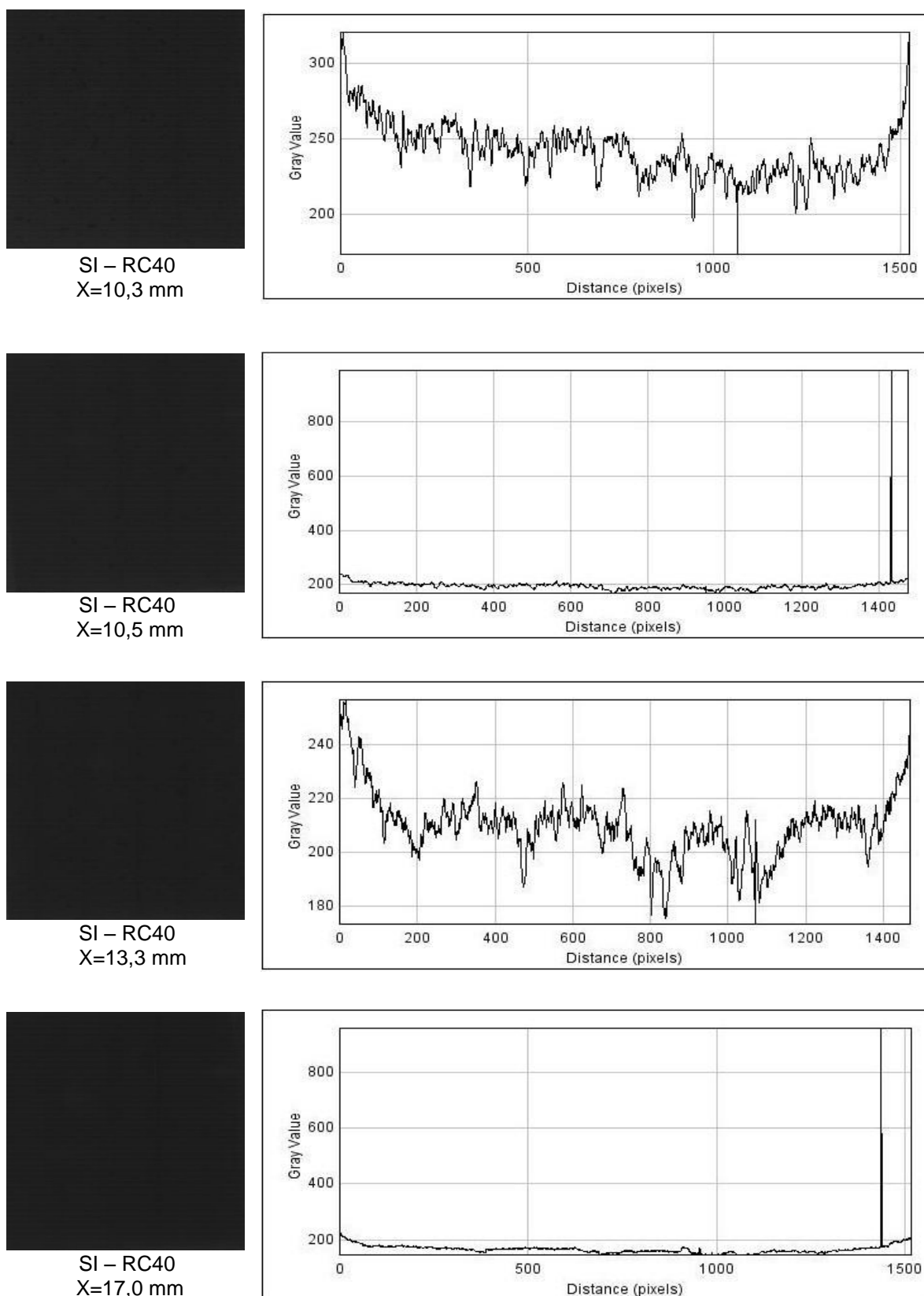




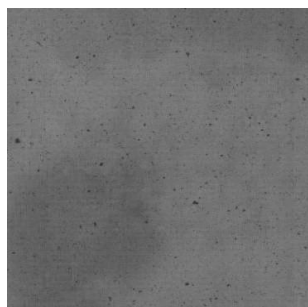


**FIGURA 4.45** – Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos SI – RC20, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA).

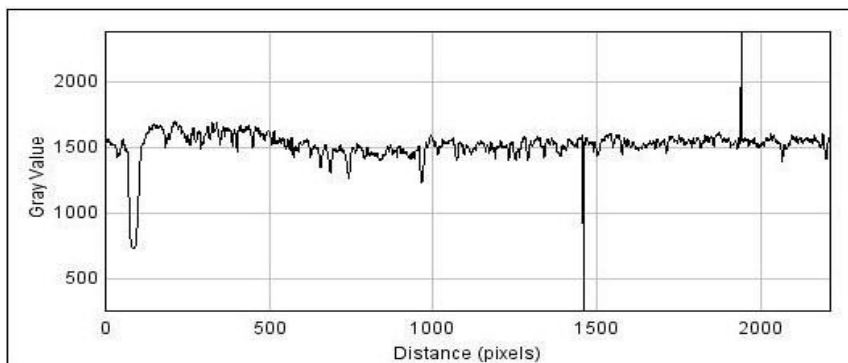




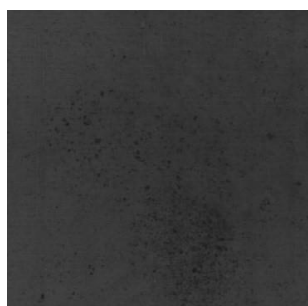
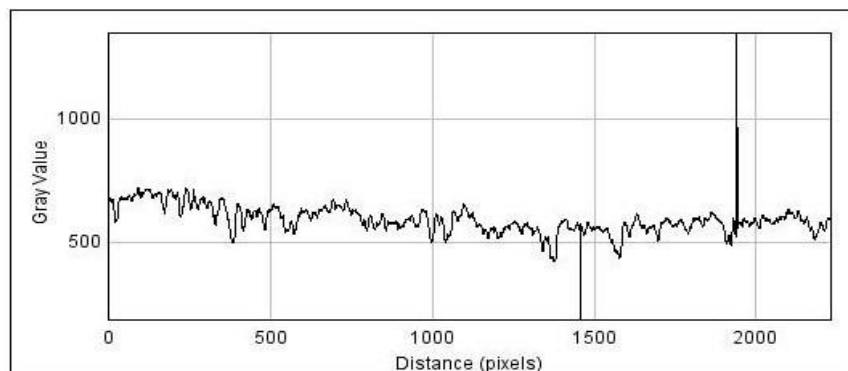
**FIGURA 4.46** – Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos SI – RC40, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA).



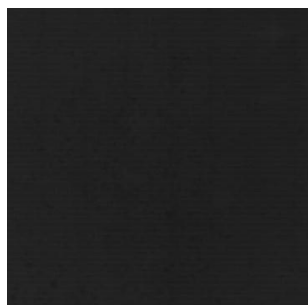
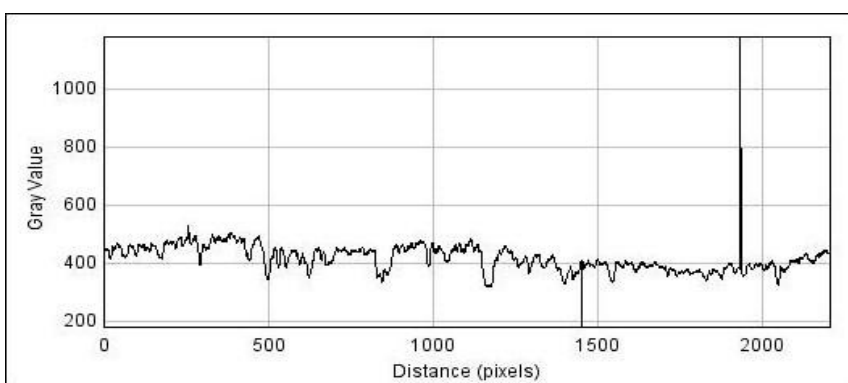
UP – RC20  
X=3,9 mm



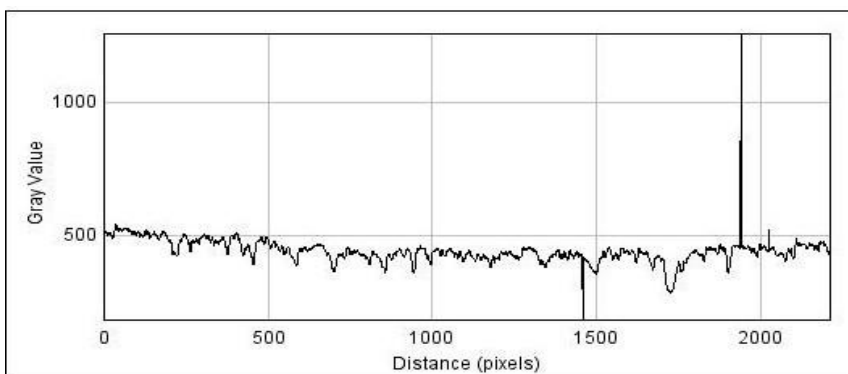
UP – RC20  
X=4,2 mm

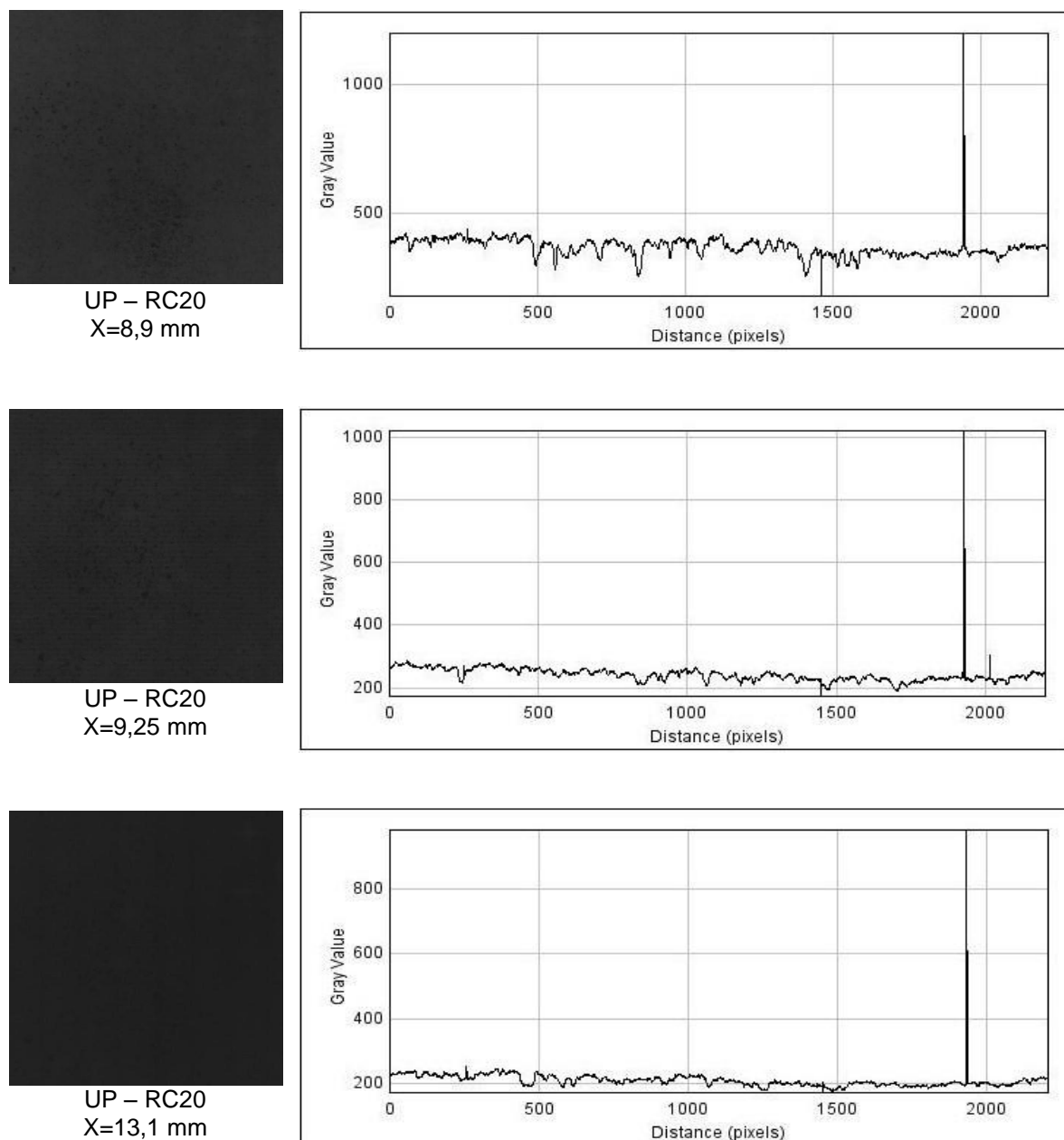


UP – RC20  
X=5,0 mm

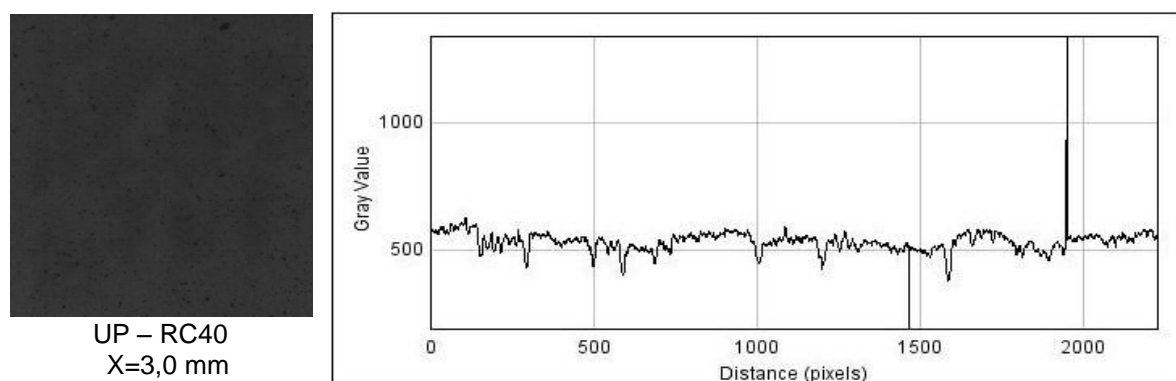


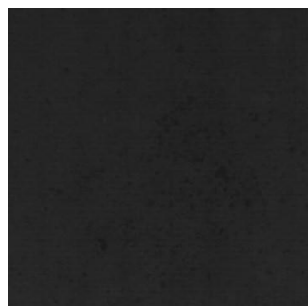
UP – RC20  
X=8,1 mm



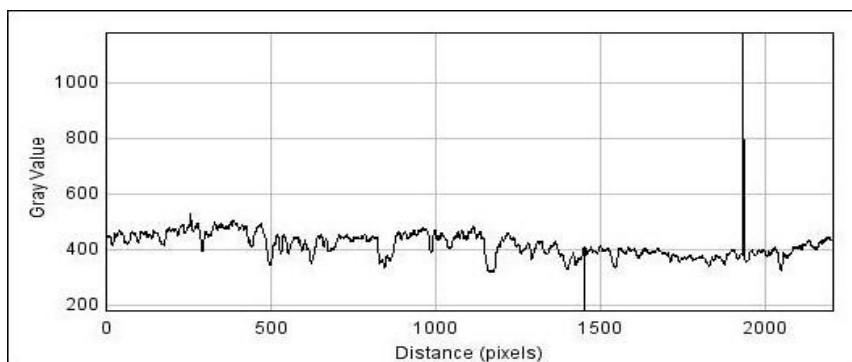


**FIGURA 4.47** – Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos UP – RC20, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA).

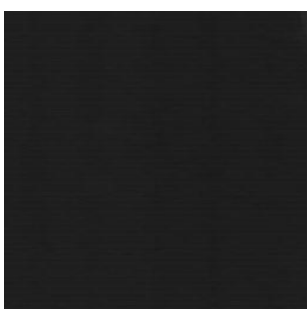
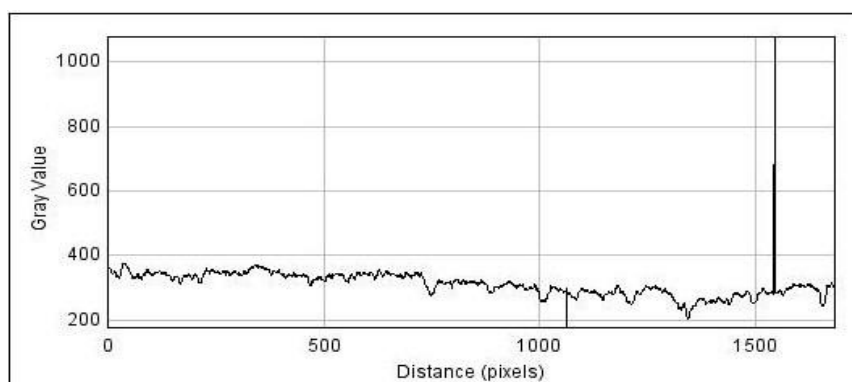




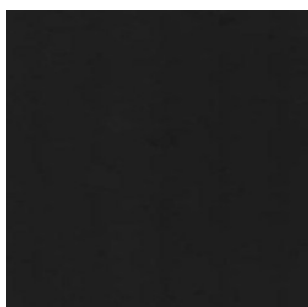
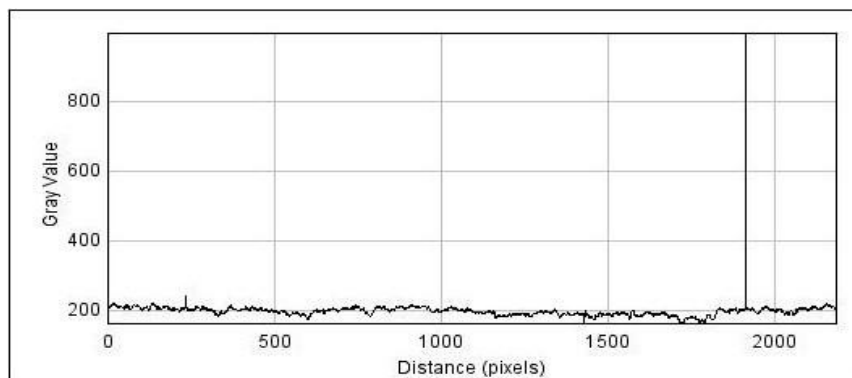
UP – RC40  
X=5,4 mm



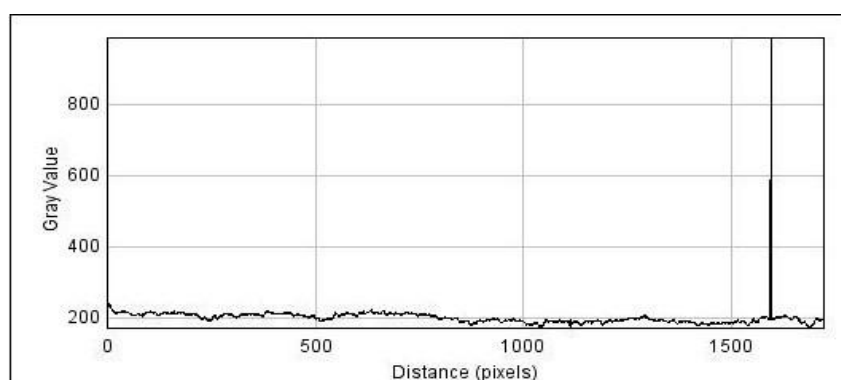
UP – RC40  
X=5,6 mm

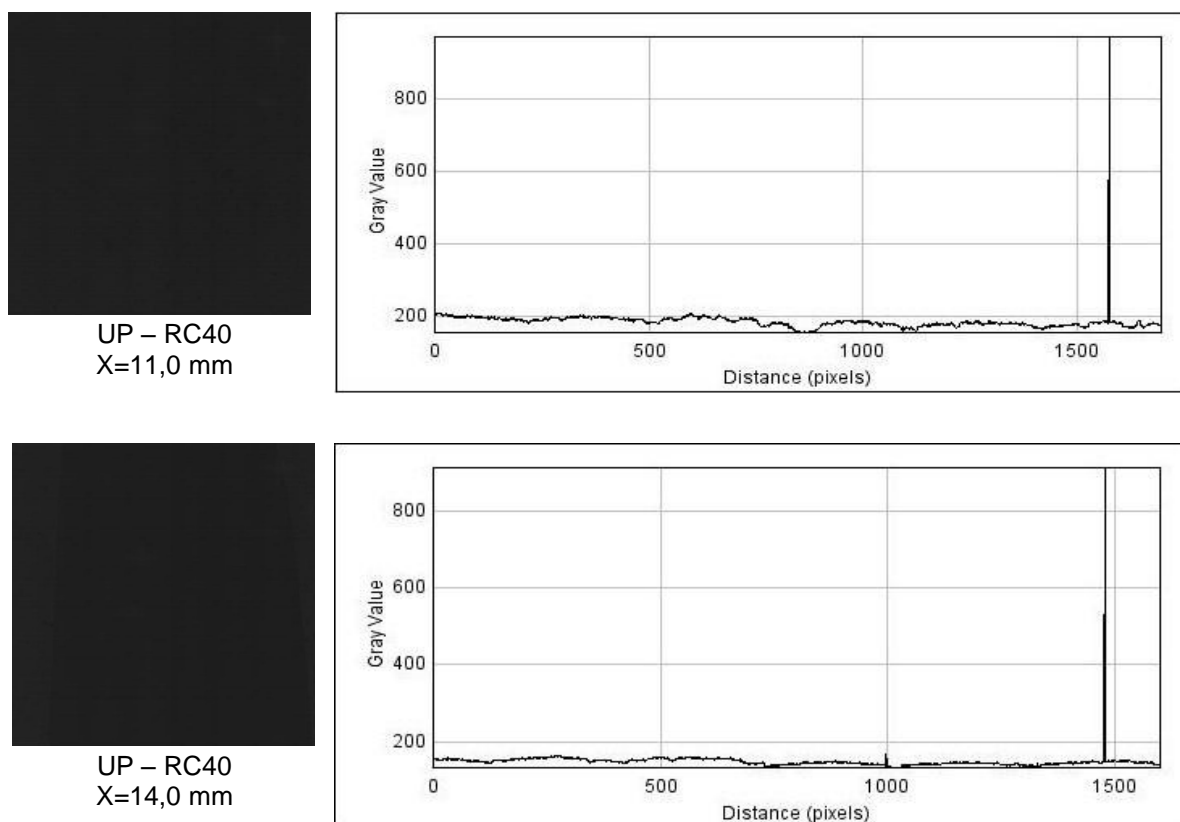


UP – RC40  
X=8,4 mm

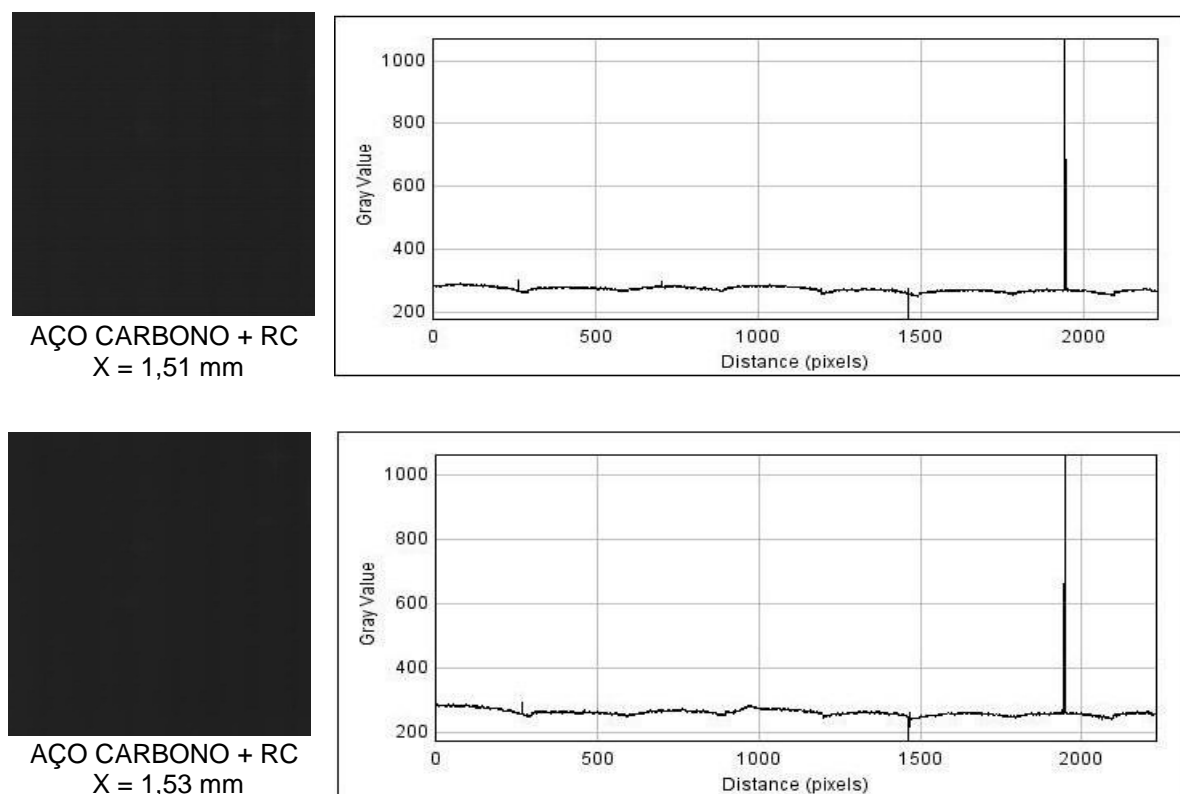


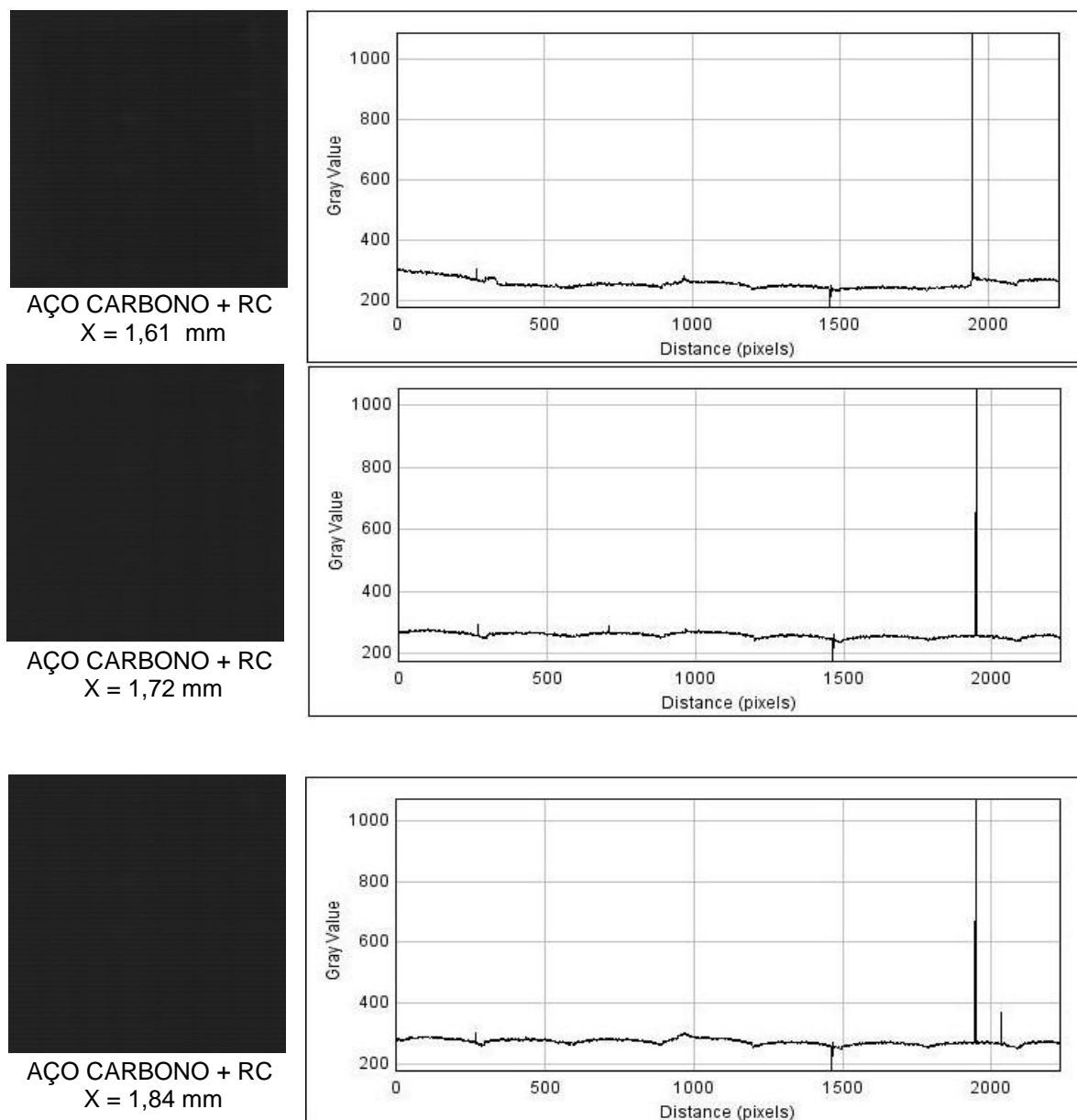
UP – RC40  
X=8,7 mm





**FIGURA 4.48** – Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para os compósitos UP – RC40, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA).





**FIGURA 4.49** – Imagens radiográficas e perfil de tons de cinza para as placas de aço carbono revestidas com RC, em função de sua espessura (70 kV – 1 mA).

Quanto mais escura é a imagem radiográfica, maior poder de atenuação ela apresenta em relação à intensidade de radiação. Nas imagens radiográficas dos compósitos poliméricos com menor espessura, observam-se tons de cinza mais claro com a presença de pontos mais escuros, referentes às partículas de resíduo de chumbo com diâmetro maior do que a média. Para as espessuras maiores, este fato não é observado. Mesmo com a presença de algumas partículas isoladas espalhadas na placa, pode-se afirmar que o compósito polimérico tem uma distribuição homogênea.

Quanto ao revestimento feito com o resíduo de chumbo sobre a superfície de aço carbono, as tonalidades de cinza chegam bastante próximas da cor preta, devido à associação do aço carbono com o substrato e a aspersão das partículas do resíduo de chumbo, que forma uma camada uniforme, conforme concluído na técnica de avaliação de superfície, utilizando MEV.

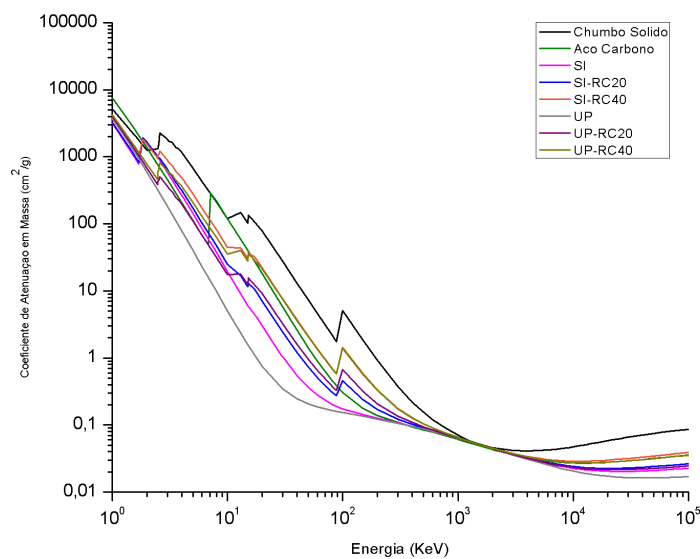
Avaliando-se os perfis de tons de cinza para os materiais propostos, pode-se perceber que para os compósitos feitos de silicone branco, a distribuição do resíduo de chumbo na forma de pó apresenta uma maior variação na distribuição de tons de cinza. Isso ocorre devido à dispersão do resíduo durante o processo de cura do polímero, comprovado também por meio da análise por MEV, comentado no item 4.7. Nos revestimentos feitos com resíduo de chumbo na forma de pó, os perfis mostram-se mais homogêneos, mesmo com pequenas variações na espessura do mesmo. Em todos os perfis há dois pontos característicos: o primeiro tende ao preto e o segundo, ao branco. Trata-se de um defeito no detetor de imagens.

#### **4.11 APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO – SIMULAÇÃO NO PROGRAMA Xcom**

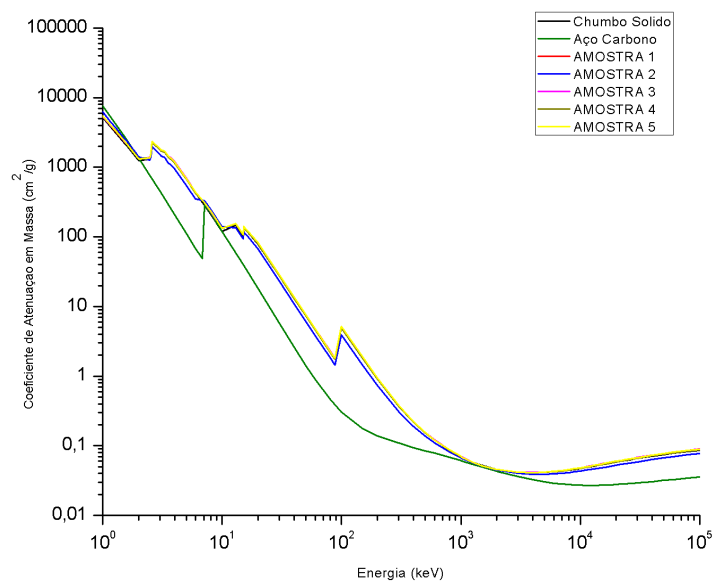
As Figuras 4.50 e 4.51 apresentam as curvas de atenuação em massa para os materiais de referência e para os compósitos poliméricos e revestimentos metálicos resultantes da simulação matemática do programa Xcom, como descrito no item 3.6.4.

Avaliando-se as curvas de atenuação pode-se confirmar que o material mais atenuante no que se refere à exposição de radiação X é o chumbo sólido, seguido do silicone branco + 40% RC, poliéster + 40% RC, poliéster + 20%RC, silicone branco + 20% RC, aço carbono, silicone branco puro e, por último, o poliéster puro.





**FIGURA 4.50** – Curvas de Atenuação em Massa x Energia – Materiais de referência e compósitos poliméricos.



**FIGURA 4.51** – Curvas de Atenuação em Massa x Energia – Materiais de referência e revestimentos metálicos.

Em função das curvas de atenuação em massa, verifica-se o bom desempenho dos revestimentos metálicos obtidos por aspersão térmica. Segundo a sua composição química, onde só é verificada a quantidade de metais presentes na

superfície, no caso, desprezando o substrato de aço carbono total ou parcialmente, percebe-se que as curvas das amostras 1, 3, 4 e 5 é quase coincidente com o material de referência (chumbo sólido). Avaliando as amostras com relação ao aço carbono, todas apresentam melhor desempenho que o mesmo.

#### 4.12 AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DOS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS EXPOSTOS AO MEIO AMBIENTE

Para a aplicação do resíduo de chumbo na indústria, é necessária a caracterização e a classificação, conforme estabelece a NBR ABNT 10004/2004. Foram feitas as análises de lixiviação e solubilização para os compósitos poliméricos feitos com poliéster + resíduo de chumbo. A Tabela 4.19 apresenta os limites máximos permitidos dos elementos para disposição do resíduo de chumbo e os valores obtidos no extrato lixiviado e solubilizado dos compósitos poliméricos.

**TABELA 4.19-** Parâmetros químicos quanto à solubilização e lixiviação de materiais.

| <b>MATERIAL</b> | <b>Solubilizado<br/>Anexo G<br/>Limite Máximo<br/>NBR10004<br/>(mg/L)</b> | <b>RESULTADO DA<br/>ANÁLISE DE<br/>SOLUBILIZAÇÃO<br/>(mg/L)</b> | <b>Lixiviado<br/>Anexo F<br/>Limite Máximo<br/>NBR10004<br/>(mg/L)</b> | <b>RESULTADO DA<br/>ANÁLISE DE<br/>LIXIVIAÇÃO<br/>(mg/L)</b> |
|-----------------|---|---|--|--|
| UP – RC20       | 0,01  | 78,25   | 1,0  | 1568,00  |
| UP – RC40       | 0,01  | 104,50  | 1,0  | 1426,25  |

Do ponto de vista do impacto ambiental, para o resíduo de chumbo adicionado ao poliéster, cujo resultado da solubilização está apresentado na tabela 4.14, foram constatados valores muito acima dos limites padrões fixados no anexo G da norma de Classificação NBR 10004/2004. Quanto aos resultados de lixiviação, os compósitos também apresentaram valores bem superiores ao limite padrão fixados no anexo F da Norma. Portanto, o material continua sendo classificado como Classe I – Perigosos.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta as conclusões gerais sobre o trabalho desenvolvido. São apresentadas, também, sugestões para trabalhos futuros, utilizando a metodologia experimental adotada e os resultados obtidos para os materiais ensaiados.

### **5.2 DISCUSSÃO GERAL**

A maior parte da radiação ionizante, a que estão expostas as pessoas em suas atividades diárias, é proveniente de fontes naturais e não de fontes artificiais.

Os efeitos das radiações sobre a saúde, tanto natural como artificial, são conhecidos relativamente bem e podem ser minimizados com medidas e práticas de segurança. A Organização Internacional de Energia Atômica, juntamente com outras organizações internacionais e especializadas, contribuem para promover e estabelecer as normas básicas de segurança no plano internacional, para assegurar que as fontes de radiação e as substâncias radioativas sejam utilizadas com a máxima segurança em proveito da humanidade.

Esta pesquisa teve como objetivo principal verificar a utilização do resíduo de chumbo em forma de pó, obtido da reciclagem de baterias, em compósitos poliméricos, por meio da mistura do polímero com o resíduo e revestimento metálico depositado por aspersão térmica, para serem utilizados como barreira de proteção em ambientes sujeitos à radiação ionizante ( $\gamma$  e X).

No intuito de desenvolver um produto mais econômico, foi sugerida a confecção de placas flexíveis para serem comparadas às mantas de chumbo plumbíferas e placas rígidas (poliméricas e revestidas com metal), para substituírem os materiais comumente utilizados (argamassa baritada e lâminas de chumbo). A metodologia de deposição por aspersão térmica à chama indica a viabilidade da blindagem de equipamentos que produzem radiações. A deposição do metal por aspersão térmica, que é uma tecnologia que produz revestimentos de metalurgia

diferentes da clássica fundição, não é tão difundida quando se trata do metal chumbo, uma vez que ele pode ser perigoso no que se refere à contaminação das pessoas. Neste caso, faz-se necessária uma ampla pesquisa para verificar quais propriedades e características devem ter os revestimentos de resíduo de chumbo, quando produzidos por aspersão térmica, e a forma de aplicação para garantir os riscos à saúde.

Tal justificativa é reforçada tendo em vista a utilização de subprodutos gerados pelas indústrias, reciclando-os e aproveitando-os como componentes na elaboração de barreiras contra radiações ionizantes.

### **5.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA**

A contribuição principal desta pesquisa foi mostrar a aplicabilidade de um material reciclado na confecção de materiais para serem usados como barreiras de proteção na área de proteção radiológica.

Isso se comprova avaliando as curvas de atenuação para radiação gama e raios X, apresentadas no capítulo 4. Pode-se perceber que os compósitos poliméricos com 40% de resíduo de chumbo, na forma de pó, resultaram em excelentes resultados quanto à aplicação em barreiras de proteção (equivalente a 0,6 mm de chumbo).

Como o trabalho englobou vários materiais, puderam-se obter também referências do comportamento a respeito da atenuação de materiais não comumente utilizados, tais como: silicone, poliéster e aço carbono.

No que se refere aos revestimentos metálicos, à contribuição foi o estudo do processo de revestimento do substrato, neste caso, aspersão térmica à chama. Estes materiais também confirmaram sua eficácia para a finalidade especificada (proteção radiológica).

## 5.4 CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões que podem ser apresentadas em função do trabalho desenvolvido são:

Pode-se utilizar o resíduo de chumbo, obtido por meio da reciclagem de baterias automotivas como substitutivo do chumbo em pó na fabricação de compósitos, tendo em vista a sua composição mineralógica semelhante ao do material de referência e seu comportamento físico e mecânico aprovados conforme foi apresentado no trabalho. Mesmo se tratando de um material classificado como perigoso (RC), de acordo com as normas referentes ao meio ambiente, quando o resíduo de chumbo é reaproveitado na forma de placas ou de revestimentos, aumenta a vida útil do produto (resíduo de chumbo), diminuindo assim o dano ambiental.

Pelo fato de se utilizar o resíduo de chumbo na forma de pó, obtido por meio da reciclagem de baterias e de outros resíduos, tais como: lâminas de chumbo de exames de raios X, odontológicos e equipamentos de proteção individual, feitos de lâminas de chumbo danificados, evita-se o depósito deste material, classificado como *perigoso*, nos aterros sanitários e, no caso dos exames de raios X (lâmina), a sua estocagem nos próprios locais de serviço, pois esta é a recomendação da Vigilância Sanitária.

A escolha da utilização do resíduo de chumbo, além da consideração quanto ao impacto ambiental, também se deve ao custo do material: 1 kg de resíduo de chumbo custa R\$ 5,50, enquanto que 1 kg de chumbo em pó vale R\$ 1.700,00. Portanto, o desenvolvimento dos compósitos se torna mais econômico se forem feitos com o pó reciclado.

Pode-se fazer uma comparação, tomando-se por base os valores de equivalência em chumbo por metro quadrado, para uma tensão de 150 kV / Corrente de 24 A e filtração de 0,7 mm Cu: 0,6 mm de lâmina de chumbo  $\approx$  17 mm de SB + 40 % RC  $\approx$  14 mm de Poliéster + 40 % RC. O custo destes materiais é de R\$ 250,00 para a lâmina de chumbo, R\$ 435,00 para os compósitos feitos com silicone branco e R\$ 190,00 para os executados com poliéster. Pode-se afirmar que, para proteções rígidas, o material proposto tem um custo menor e para as proteções flexíveis, o custo é mais elevado; porém, por serem flexíveis, possibilitam a utilização em equipamentos de proteção individual (aventais, protetores, luvas, etc.).

Os compósitos poliméricos que apresentaram os maiores índices de atenuação da radiação X nível diagnóstico (80 e 150 kV), quando comparados com o material de referência (Pb), possuem a proporção em massa de 40% de resíduo de chumbo na forma de pó.

Os materiais revestidos com resíduo de chumbo em pó também apresentaram boas respostas quanto ao índice de atenuação da radiação X, valores comprovados experimentalmente e por simulação computacional. Isso se deve à presença de poucos poros nas camadas do revestimento e pela boa aderência ao substrato. Este processo pode ser aplicado na confecção de blindagens de tubos de raios X e para recuperação de equipamentos de proteção individual, por exemplo, aventais danificados.

Mesmo trabalhando em escala de laboratório, compósitos obtidos a partir da formulação proposta, contendo 20% e 40% de resíduo de chumbo, alcançaram os níveis de aceitação para serem classificados como revestimento para proteção radiológica.

As curvas de atenuação, obtidas nesta pesquisa para os diversos materiais estudados, poderão servir de base comparativa em projetos de barreiras de proteção, uma vez que os projetos usuais utilizam a aplicação de chumbo ou argamassa baritada. Se for levado em consideração o custo do material, os compósitos desenvolvidos terão um custo sensivelmente menor que os materiais tradicionalmente usados nas proteções.

Os resultados desta pesquisa poderão servir como banco de dados em programas computacionais destinados ao cálculo de barreiras de proteção.

## 5.5 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- ✓ Estudo da caracterização de outros materiais quanto à atenuação de raios X, para serem aplicados em proteção radiológica, tendo como base este trabalho.
- ✓ Desenvolvimento industrial dos compósitos estudados, levando-se em consideração o estudo das propriedades mecânicas e da geometria das placas.

- ✓ Melhoria no processo de deposição do resíduo de chumbo em materiais metálicos e poliméricos.
- ✓ Estudo da influência do teor de óxidos nos compósitos – maior ou menor poder de atenuação.
- ✓ Deposição do resíduo de chumbo através do processo de aspersão térmica em materiais flexíveis e recuperação de equipamentos de proteção individual feitos com lâmina de chumbo.





## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. ABDO, E.; ALI, M. A. M.; ISMAIL, M. R. **Natural Fibre High-density Polyethylene and Lead Oxide Composites for Radiation Shielding**. Radiation Physics and Chemistry, p. 185-195, March 2003.
2. ABINEE, **Reciclagem do Chumbo e Plástico**, 2001. Disponível em: < <http://www.abinee.org.br/programas/pro07c.htm>>. Acesso em: 03/mai/2008.
3. ABNT NBR 10004. **Resíduos sólidos – Classificação**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.
4. ABNT NBR 10005. **Lixiviação de resíduos - Procedimento**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.
5. ABNT NBR 10006. **Solubilização de resíduos - Procedimento**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.
6. ABNT NBR/IEC 61331-1. **Dispositivos de proteção contra radiação-X para fins de diagnóstico médico - Parte 1: Determinação das propriedades de atenuação de materiais**. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004.
7. ALMEIDA, J.R.; MONTEIRO, S.N. **The Resin/hardener Ratio as a Processing Parameter for Modifying the Mechanical behavior of Epóxi-matrix/Glass Microsphere Composites**. Composites Science and Technology, vol. 58, Elsevier Science Publisher B. V., 1998, pp. 1593 - 1598.
8. AMIN, M. **Coating Quality in are Spraying-getting it Righth**. The Welding Institute Bulletin. v. 3, p.52-57, May/Jun. 1992.
9. ARCHER, B.R.; THORNBLY, J.I.; BUSHONG, S.C. **Diagnostic X-ray Shielding Design Based on an Empirical Model of Photon Attenuation**. Health Physics, v. 44, n. 5, p. 507-517, 1983.
10. ARCHER, B.R. FEWELL, T.R.; CONWAY, B.J.; QUINN, P.W. **Attenuation Properties of Diagnostic X-ray Shielding Materials**. Medical Physics, v. 21, n. 9, p. 1499-1507, 1994.
11. ARCHER, B. R. **History of the Shielding of Diagnostic X-ray Facilities**. Health Physics, v. 69, n. 5, p. 750-758, 1995.
12. ASTM B487. **Test Method for Measurement of Metal and Oxide Coating Thickness by Microscopical Examination of a Cross Section**. American Society for Testing and Materials, 2007.
13. BAENAS, J. M. H. **Cadeia de reciclagem das baterias veiculares: estudo da gestão de um fluxo logístico reverso para os pequenos fabricantes**. Dissertação de Mestrado. UNESP – Campus Bauru, 2008.
14. BARROS, F. S. **Determinação das Propriedades de Atenuação de Tijolos Cerâmicos Maciços e Argamassas Baritadas para sua Utilização como Barreira de Proteção em Salas de Radiodiagnóstico**. Dissertação de Mestrado. CPGEI – CEFET-PR, Curitiba, 2001.
15. BARROS, F. S.; SCHELIN, H. R.; COSTA, P. R.; TILLY Jr.; J. G.. **Determinação das Propriedades de Atenuação de Tijolos Cerâmicos Maciços para a sua Utilização como Barreira de Proteção em Salas de Radiodiagnóstico**. II Congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica – Habana 2001. Havana, Cuba, maio 23-25, 2001.
16. BORBECK, K.D. **Market Survey of Thermal Spraying**. Welding and Cutting. v. 8, p. 118-119, Aug. 1990.
17. BRITTON, C.R. **Flame Spraying With Aluminium and Aluminium Alloys**. Aluminium Industry. v. 7, n. 10, p. 5-7, Dec.1988.
18. BUSHBERG, J. T.; SEIBERT, J. A.; LEIDHOLDT JR., E. M.; BOONE, J. M. **The Essential Physics of Medical Imaging**. Maryland: Williams & Wilkins, 1994.

- 19.CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Disponível em: <http://www.cempre.org.br>. Acesso em: 15 jan. 2009.
- 20.CHAWLA, K.K. **Composite Material Science and Engineering**. Springer Verlag. New York, p. 3-5, 1987.
- 21.CLARE, J.H.; CRAWMER, D.E. **Thermal Spray Coating**. In: **American Society for Metals**. Surface cleaning, finishing and coating. v. 5, p. 361-374, Ohio, 1982.
- 22.CNEN-NE-3.01 - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes Básicas de Radioproteção**. São Paulo, 2005.
- 23.COSTA, P. R.; NERISSIAN, D. Y.; PITORRI, R. C.; CALDAS, L. V. E. **Distribuição de Cargas de Trabalho utilizadas em Exames Radiológicos**. Poster apresentado na 29ª Jornada Paulista de Radiologia. São Paulo - SP, abril 22-25, 1999.
- 24.COSTA, P. R. **Salas para Radiologia Dia**. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.
- 25.DANIEL, I.M.; ISHAI, O. . Oxford University Press, Inc., New York, NY, USA, 1994.
- 26.DE VOS, D. C. **Basic Principles of Radiographic Exposure**. Westwood: Williams & Wilkins, 2 ed., 1995.
- 27.DESHPANDE, S.; SAMPATH, S.; ZHANG, H. **Mechanisms of oxidation and its role in microestrutural evolution of metallic thermal spray coatings – Case study for Ni-Al**. Surface & Coatings Technology, 2005.
- 28.DIN 4768. **Ermittlung der Rauheitskenngrößen  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  mit Elektrischen Tastschnittgeräten**. Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 1990.
- 29.DNPN – Departamento Nacional de Produção Mineral. Consulta internet: <http://www.dnpp.gov.br>. Acesso em: 20 de dezembro de 2007.
- 30.EPA. **Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Lead and Compounds**, EPA-454/R-98-006, index of /ttnchie1/efdocs/, Lead 1.pdf. U.S Environmental Protection Agency, 1998.
- 31.FAO/OMS - **Documento de Trabajo sobre el Plombo** - 26ª Reunion del Comité Del Codex sobre Aditivos Contaminantes de los Alimentos - Febrero, 1994.
- 32.FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. São Carlos: EDUFSCar, p. 277, 1996.
- 33.FREITAS, L. C.; DREXLER, G. **The Role of Secondary Standard Dosimetry Laboratories in Diagnostic Radiology**. Radiation Protection Dosimetry , v. 43, n. 1, p. 99-102, 1992.
- 34.FRIMAIO, A. **Desenvolvimento de um Material Cerâmico para Utilização em Proteção Radiológica Diagnóstica**. Dissertação de Mestrado. IPEN – USP, São Paulo, 2006.
- 35.GRASME, D. **Are Spraying of Aluminium**. Welding and Cutting. v. 8, p. 124-125, Aug. 1990.
- 36.GODOI, W. **Detecção de Defeitos em Isoladores Poliméricos por Radiografia Digital**. Dissertação de Mestrado. UFPR, Curitiba, 2005.
- 37.HASHIN, Z. **Analysis of Composite Materials**. Journal of Applied Mechanics, vol. 50, 1983, p. 481 - 505.
- 38.HEINRICH, P. **Thermal spraying – facts and state-of-the-art**. Sonder e Druck. Hoellriegelskreuth, v. 10, p. 3-28, Out. 1992.
- 39.HEINRICH, P.; PENSZIOR, Ch.; MEINA, H. **Gase zum Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen**. Proceed. of the 4. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, Erding, Germany, 44-54, Nov. 1997, pp. 13-21.

40. HOEHNE, K. **Haftvermittelnde Schichten beim Thermischen Spritzen von Metallen**. Schwei technik, v. 35, n. 11, p. 497-499, Nov. 1985.
41. **Quality Assurance Measurements in Diagnostic Radiology**. London: HPA, 1979. (Conf. Report Series 29).
2. HUSSAIN, R.; ZIA-UL-HAQ; MOHAMMAD, D. **A Study of the Shielding Properties of Poly Ethylene Glycol – Lead Oxide Composite**. Radiation Physics, p. 81-84, 1997. (Journal of Islamic Academy of Sciences 10:3, 81-84, 1997).
43. IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. TECDOC 663. **Basic Safety Standards**. Viena, 1994.
44. ICRP. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Summary of the Current ICRP Principles for Protection of the Patient in Diagnostic Radiology**. Oxford and New York: Pergamon Press, 1993 (Report of Committee 3 of the ICRP).
45. ICRP 26. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Oxford and New York: Pergamon Press, 1977.
46. ICRP 60. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Oxford: Pergamon Press, 1991.
47. ICRU 33. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS. **Radiation Quantities and Units**. Bethesda, MD: ICRU Publications, 1980. (ICRU Report 33).
48. ICRU 40. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS. **The Quality factor in Radiation Protection**. Bethesda, MD: ICRU Publications, 1986. (ICRU Report 40).
49. ICRU 47. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS. **Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiation**. Bethesda, MD: ICRU Publications, 1992. (ICRU Report 47).
50. ICRU 51. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL UNITS AND MEASUREMENTS. **Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry**. Bethesda, MD: ICRU Publications, 1993. (ICRU Report 51).
51. JOHNS, H. E.; CUNNINGHAM, J. R. **The Physics of Radiology**. Charles C. Thomas Publication. Springfield, 4th ed., 1983.
52. JOLLY, R., RHIN, C. **The Recycling of Lead-acid Batteries: Production of Lead and Polypropylene**. Resources, Conservations and Recycling, v.10, p. 137 – 143, 1994.
53. KATZ, H.S.; BRANDMAIER, H.E. **Concise Fundamentals of Fiber-Reinforced Composites**. Handbook of Reinforcement for Plastics, 1987.
54. KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. CEC Press LLC, 1997.
55. KHAN, F. M. **The Physics of Radiation Therapy**. Baltimore, MD: Williams & Wilkins, 1994.
56. KREYE, H.; KIRSTEN, A.; GÄRTNER, F.; QI, X.; KRÖMMER, W. **High Velocity Combustion Wire Spraying - Systems and Coatings**. Proceed. of the International Thermal Spray Conference (ITSC 2001), C. C. Berndt, K. A. Khor and E. F. Lugscheider (Eds.), ASM International, Materials Park, Ohio (2001), pp. 461-466.
57. KREUSCH, M. A. **Avaliação com propostas de melhoria do processo industrial de reciclagem do chumbo e indicação de aplicabilidade para a escória gerada**. Dissertação de Mestrado. UFPR, Curitiba, 2005.
58. LDAI. The International Lead Association. Disponível em: <http://www.ldaint.org>. Acesso em: 10 jul. 2008.

- 59.LUGSHEIDER, E., ESCHNAUER, H., MÜLLER, U., WEBER, Th. **Quo vadis, thermal spray technology**. Powder Metallurgy International. v. 23, n. 1, p. 33-40, Jan. 1991.
- 60.MACHADO, I. P. **Avaliação Ambiental do Processo de Reciclagem de Chumbo**. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 144 p. (Dissertação de Mestrado).
- 61.MACHADO, P. A. L. **Direito Ambiental Brasileiro** - S. Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 1982.
- 62.MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a Polímeros**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2ed., 1999.
- 63.MARANHO, Ossimar. **Influência da Preparação da Superfície na Aderência de Revestimentos de Alumínio Depositados por Aspersão Térmica à Chama**. Florianópolis – SC: UFSC, 1996. Dissertação – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- 64.MARK, J. E. **Physical Properties of Polymers Handbook**. American Institute of Physics, p.371-372, 2000.
- 65.MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R.D. **Composite Materials: Engineering and Science**. Chapman & Hall. 15t Edition, p. 3-8, 1994.
- 66.MAYER, C.A. **Thermal spray coating – a Money-saving technology**. Welding Design & Fabrication. p. 66-74, feb. 1982.
- 67.MEDITEXT - **Lead - Medical Management**. In: Hall AH & Rumac BH (Eds): Tomes System.1998.
- 68.MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compósitos e Estruturas – Sanduíche, Projeto e Análise**. Editora Manole, 2005.
- 69.NCRP 49. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Structural Shielding Design and Evaluation for Medical use of X-rays and Gamma Rays of Energies up to 10 Mev**. Bathesda: NCRP Publications, 1976. (NCRP Report 49).
- 70.NCRP 107. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Implementation of the Principle of as Low as Reasonably Achievable (ALARA) for Medical and Dental Personnel**. Bathesda: NCRP Publications, 1990 (NCRP Report 107).
- 71.NCRP 147. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Structural Shielding Design for Medical X-rays Imaging Facilities**. Bathesda: NCRP Publications, MD, 2004. (NCRP Report 49). NCRP 147
- 72.NM 23:2000 – **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. NORMA MERCOSUR, 2000.
- 73.NOUEIRA, M. S. **Determinação dos Fatores de Conversão de Kerma no Ar e de Fluência para o Equivalente de Dose Ambiental para Raios X Gerados no Intervalo de 50kVp a 125kVp**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.
- 74.Norma Petrobrás: **N-2568 – Revestimentos anticorrosivos aplicados por aspersão térmica**. Janeiro, 2003.
- 75.OIEA. ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. **Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación**. Viena: OIEA, 1997. (Colección Seguridad 115).
- 76.PARKER, D. W., KUTNER, G. L. **HVOF-spray Technology-poised for Growth**. Advanced Materials & Processes, v. 4, p. 68-74, Apr. 1991.
- 77.PEIXOTO, J. E. CURSO REGIONAL DE CAPACITACION SOBRE PROTECCION RADIOLÓGICA EN LA PRÁCTICA MÉDICA. **Deseño y Verificación de Blindajes de Instalaciones de Radiodiagnóstico**. Notas do curso básico de licenciamento e fiscalização em

- radiologia médica e odontológica. IRD, Rio de Janeiro, 1994.
78. PORTARIA n.º 453. **Diretrizes de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico Médico e Odontológico**. Ministério da Saúde. Diário Oficial da União. Brasília: 01 de junho de 1998.
79. PORTARIA n.º 1884/GM. **Normas para Projetos Físicos de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde**. Ministério da Saúde. Diário Oficial da União. Brasília: 11 de novembro de 1994. 136p.
80. PORTARIA n.º 2043. **Sistema de Garantia de Qualidade de Produtos Correlatos Submetidos ao Regime da lei nº 6.360, de 27 de setembro de 1976, e o decreto nº 79.094, de 05 de janeiro de 1977**. Ministério da Saúde. Diário Oficial da União. Brasília: 12 de dezembro de 1994.
81. QUOIRIN, N. S. R. **Diagnóstico de Defeitos em Madeira por Tomografia de Raios X**. Dissertação de Mestrado – UFPR. Curitiba, 2004.
82. RESOLUÇÃO – RDC n.º 189. **Regulamento dos Procedimentos de Análise, Avaliação e Aprovação de Projetos Físicos de Estabelecimentos de Saúde no Sistema Nacional de Vigilância Sanitária**. Diário Oficial da União. Brasília: 18 de julho de 2003.
83. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 257/1999 - **Estabelece que pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos, tenham os procedimentos de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final ambientalmente adequados**. - Data da legislação: 30/06/1999 - Publicação DOU nº 139, de 22/07/1999, p. 28-29 - Status: Vigente (em processo de revisão).
84. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357/2005 - **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. - Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63.
85. RESOLUÇÃO ESTADUAL SS-625. Norma Técnica que dispõe sobre o **Uso, Posse e Armazenamento de Fontes de Radiação Ionizante no Âmbito do Estado de São Paulo**. Diário Oficial do Estado. São Paulo: 14 de dezembro de 1994.
86. RODRIGUEZ, R. M. H. P. **Formação de Óxidos nos Revestimentos de Alumínio depositados por Aspersão Térmica**. Tese de Doutorado. UFPR, Curitiba-PR, 2003.
87. SBRT – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas. Consulta internet: **Tipos de Silicône**. <http://www.sbrt.ibict.br>. Acesso em: 20 de maio de 2008.
88. SCAFF, L. A. M. **Física da Radioterapia**. São Paulo, SP: SARVIER, 1997.
89. SCHIEFLER F., M. F. O. **Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por aspersão Térmica**. Tese de Doutorado. UFSC, 2004.
90. SILAEX. Consulta internet: **Tipos de Poliéster**. <http://www.silaex.com.br>. Acesso em: 20 de maio de 2008.
91. SIMPKIN, D.J. **Evaluation of NCRP Report Nº49 Assumptions on Workloads and Use Factors in Diagnostic Radiology Facilities**. Medical Physics, v. 23, n. 4, p. 577-584, 1996.
92. SMITH, R. W.; NOVAK, R. **Advances and applications in U. S. thermal spray technology**. Powder Metallurgy International. v. 23, n. 3, p. 147-155, Mar. 1991.
93. SPRAWLS, P. **Principles of Radiography for Technologists**. Maryland: Na Aspen Publication, 1990.
94. THORPE, M. L. **Thermal Spray - Industry in Transition**. Advanced Materials & Processes. v. 5, p. 50-61, mai. 1993.
95. WOLBARST, A. B. **Physics of Radiology**. Norwalk, CT: Appleton & Lange, 1993.
96. WHO - **Human Exposure to Lead**. In. **Human Exposure Assessment Series**, WHO, 1992.

97. WINCKEL, J. W.; RICE, D. M. **Lead Market Trends – Technology and Economics**. Journal of power sources. v.73, Issue 1, p.3-10, may 1998.
98. WRIGHT, D. J.; RAMSDALE, M. L. **The use of national and locally set reference dose level in a regional programme for dose reduction in diagnostic radiology**. Radiation Protection Dosimetry, v. 80, n. 1, p. 103-107, 1998.
99. Xcom Program. **National Institute of Standard Technology (NIST)**. Disponível em: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. Acesso em: 20 de maio de 2008.
100. ZIMMERMANN, S. **Hochgeschwindigkeits - Flamspritzen von Molybdän - Charakterisierung des Spritzprozesses und der Schichteigenschaften**. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany, 1997, 138p.

## APÊNDICE 1 – CONCEITOS APLICADOS À PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Um dos problemas na blindagem de raios X surge da falta de dados experimentais para explorar toda a faixa de uso dos aparelhos destinados a esta atividade.

Para controlar a exposição dos trabalhadores, dos pacientes em tratamento médico e do público, muitos países têm elaborado leis que se apoiam em medidas administrativas. Também é importante contar com normas internacionalmente reconhecidas, visto que a sua elaboração e o seu aperfeiçoamento têm desempenhado um papel de destaque no Organismo Internacional de Energia Atômica (OIEA). Este Organismo, juntamente com a Organização Mundial da Saúde, a Organização Internacional do Trabalho, a Agência para a Energia Nuclear, a Organização para a Agricultura e Alimentação e a Organização Pan-americana da Saúde, tem revisado e atualizado recentemente suas Normas Básicas Internacionais de Segurança (NBS), para a proteção contra a radiação ionizante e para a segurança das fontes de radiação (OIEA, 1997).

No planejamento de um setor radiológico, de acordo com as recomendações nacionais e internacionais, além do projeto com as devidas considerações de ordem funcional e do plano de instalações e obras, deve-se desenvolver como fator de grande importância, um projeto de proteção radiológica que será apresentado para a devida aprovação e, posteriormente, entregue ao usuário das instalações no momento da entrada em funcionamento.

Seguem, abaixo, algumas definições importantes para a proteção radiológica:

*Radiação Ionizante*, para fins de proteção radiológica, é qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria biológica, ioniza seus átomos ou moléculas.

*Proteção Radiológica* é um conjunto de medidas que visa proteger o homem, seus descendentes e seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos, causados pela radiação ionizante, também chamada de radioproteção.

*Barreiras de Proteção* são barreiras de material absorvente. Conforme a proteção desejada contra os raios-X, primários ou secundários, são denominadas barreiras primárias ou barreiras secundárias.

*Radiação Primária* é a radiação originada diretamente no ponto focal do tubo de raios X, ou na fonte radioativa.

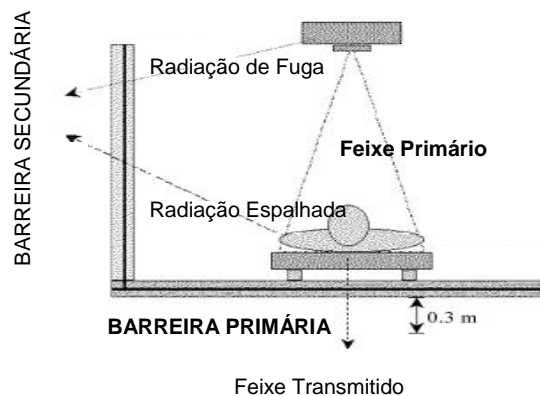
*Radiação Dispersa* é a radiação que não serve para qualquer fim útil, inclusive radiação direta e secundária de objetos irradiados. Radiação direta é toda a radiação saindo do tubo de raios X (com exceção do feixe útil, sendo ela absorvida em sua maior parte pela cúpula protetora).

*Radiação secundária* são raios espalhados por qualquer objeto ao receber radiação mais a radiação de fuga.

*Radiação de Fuga ou Vazamento* é toda a radiação, exceto o feixe útil, que emana da câmara que contém a ampola ou a fonte de radiação.

*Feixe útil* é a parte aproveitável da radiação primária, que passa pela abertura da câmara, de um cone localizador ou de outro meio limitador.


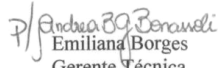

A Figura 1.1 mostra a disposição e as definições apresentadas acima. O feixe de radiação primária colimado é chamado de feixe útil. Qualquer estrutura construída, para qual seja apontado o feixe útil, é chamada de *barreira de proteção primária*. A distância do alvo do tubo de raios X à *barreira de proteção primária*, que somente interceptam radiação espalhada do paciente ou radiação de vazamento do invólucro da fonte, são chamados *barreiras de proteção secundária*. O paciente, que age como meio espalhador, está a uma distância  $d_e$  da fonte.







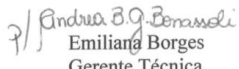

**FIGURA 1.1** – Geometria utilizada nas equações derivadas para o cálculo das espessuras das barreiras de proteção utilizada pelo NCRP 147. Considera-se a barreira primária de proteção de espessura  $S_p$ , a uma distância  $d_s$  perpendicular ao eixo central do feixe primário, e a barreira secundária de proteção de espessura  $S_s$ , a uma distância  $d_p$  do ponto focal do tubo de raios X na direção do eixo do feixe primário. Considera-se, ainda, um objeto espalhador, paciente, posicionado a uma distância  $d_e$  do ponto focal do tubo de raios X na direção do feixe primário (Adaptada da NCRP 147, 2004).



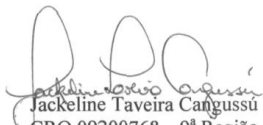


## APÊNDICE 2 – ANÁLISES E REFERÊNCIAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

|  <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ</b><br>SETOR DE TECNOLOGIA<br><b>CEPPA - CENTRO DE PESQUISA E PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS</b><br>CENTRO POLITÉCNICO - PRÉDIO DAS USINAS PILOTO - BLOCO B - SALA PP01<br>CX. P. 19.083 - FONES: (41) 3366-3668 / 3361-3195 - FAX: (41) 3266-1647<br>e-mail: ceppa@ufpr.br - www.ceppa.ufpr.br - CEP 81531-990 - CURITIBA - PARANÁ |                                 |
|---|---------------------------------|
| <b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b> Nº 114843   |                                 |
| PRODUTO: POLÍMERO COM CHUMBO – LIXIVIADO – POLI 20<br>FABRICANTE/PRODUTOR: ---X---<br>SOLICITANTE: Frieda Saicla Barros<br>ENDEREÇO: Rua Bonifácio Batista Ribas, 361 Barreirinha - Curitiba/PR<br>PROTOCOLO DE RECEPÇÃO DE AMOSTRA Nº 2005 – 17/12/08<br>AMOSTRA Nº 5855/08  |                                 |
| <b>RESULTADOS</b> 01/01   |                                 |
| Descrição do produto: amostra recebida sob temperatura ambiente, acondicionada em 01 frasco plástico opaco com volume aproximado de 50 mL.  |                                 |
| <b>PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS</b>  |                                 |
| Chumbo (mg/L)   | 1.568,00                        |
| REFERÊNCIAS<br>STANDARD methods for examination of water and wastewater 21 <sup>st</sup> edition, 2005. Chapter 3000, p. 3-17 – 3-19; method 3111 B   |                                 |
| Dados do ensaio:<br>Início: 22/12/08      Término: 23/12/08      Responsável: Andrea B. G. Bonassoli.   |                                 |
| <div style="text-align: right;"><br/>Emiliania Borges<br/>Gerente Técnica<br/>CRQ 09100126</div>   |                                 |
| /s  | Curitiba, 12 de janeiro de 2009 |
| <div style="text-align: right;"><br/>Jackeline Taveira Cangussu<br/>CRQ 09200768 – 9ª Região<br/>Coordenadora do Laboratório</div>   |                                 |
| OBSERVAÇÃO: • A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO CEPPA.<br>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.<br>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.   |                                 |

|   |                                       |  |
|---|---------------------------------------|--|
|    | <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ</b> |  |
|   | SETOR DE TECNOLOGIA                   |  |
| <b>CEPPA - CENTRO DE PESQUISA E PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS</b>  |                                       |  |
| CENTRO POLITÉCNICO - PRÉDIO DAS USINAS PILOTO - BLOCO B - SALA PP01<br>CX. P. 19.083 - FONES: (41) 3366-3668 / 3361-3195 - FAX: (41) 3266-1647<br>e-mail: ceppa@ufpr.br - www.ceppa.ufpr.br - CEP 81531-990 - CURITIBA - PARANÁ   |                                       |  |
| <b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b> Nº 114844   |                                       |  |
| PRODUTO: POLÍMERO COM CHUMBO – LIXIVIADO – POLI 40  |                                       |  |
| FABRICANTE/PRODUTOR: ---X---  |                                       |  |
| SOLICITANTE: Frieda Saicla Barros   |                                       |  |
| ENDEREÇO: Rua Bonifácio Batista Ribas, 361 Barreirinha - Curitiba/PR  |                                       |  |
| PROTOCOLO DE RECEPÇÃO DE AMOSTRA Nº 2005 – 17/12/08   |                                       |  |
| AMOSTRA Nº 5856/08  |                                       |  |
| <b>RESULTADOS</b>   |                                       |  |
| 01/01   |                                       |  |
| Descrição do produto: amostra recebida sob temperatura ambiente, acondicionada em 01 frasco plástico opaco com volume aproximado de 50 mL.  |                                       |  |
| <b>PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS</b>  |                                       |  |
| Chumbo (mg/L)   |                                       | 1.426,25   |
| REFERÊNCIAS<br>STANDARD methods for examination of water and wastewater 21 <sup>st</sup> edition, 2005. Chapter 3000, p. 3-17 – 3-19; method 3111 B   |                                       |  |
| Dados do ensaio:  |                                       |  |
| Início: 22/12/08  | Término: 23/12/08                     | Responsável: Andrea B. G. Bonassoli.   |
|   |                                       | <br>Emiliania Borges<br>Gerente Técnica<br>CRQ 09100126                                   |
| /s  | Curitiba, 12 de janeiro de 2009       |  |
|   |                                       | <br>Jackeline Taveira Cangussu<br>CRQ 09200768 – 9ª Região<br>Coordenadora do Laboratório |
| OBSERVAÇÃO: • A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO CEPPA.<br>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.<br>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO. |                                       |  |

|   |   |
|---|---|
|    | <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ</b><br>SETOR DE TECNOLOGIA<br><b>CEPPA - CENTRO DE PESQUISA E PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS</b><br>CENTRO POLITÉCNICO - PRÉDIO DAS USINAS PILOTO - BLOCO B - SALA PP01<br>CX. P. 19.083 - FONES: (41) 3366-3668 / 3361-3195 - FAX: (41) 3266-1647<br>e-mail: ceppa@ufpr.br - www.ceppa.ufpr.br - CEP 81531-990 - CURITIBA - PARANÁ |
| <b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b> Nº 114846   |   |
| PRODUTO: POLÍMERO COM CHUMBO – SOLUBILIZADO – POLI 20<br>FABRICANTE/PRODUTOR: ---X---<br>SOLICITANTE: Frieda Saicla Barros<br>ENDEREÇO: Rua Bonifácio Batista Ribas, 361 Barreirinha - Curitiba/PR<br>PROTOCOLO DE RECEPÇÃO DE AMOSTRA Nº 2030 – 22/12/08<br>AMOSTRA Nº 5968/08     |   |
| <b>RESULTADOS</b> 01/01   |   |
| Descrição do produto: amostra recebida sob temperatura ambiente, acondicionada em 01 frasco plástico opaco com volume aproximado de 100 mL.   |   |
| <b>PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS</b>  |   |
| Chumbo (mg/L)   | 78,25   |
| REFERÊNCIAS<br>STANDARD methods for examination of water and wastewater 21 <sup>st</sup> edition, 2005. Chapter 3000, p. 3-17 – 3-19; method 3111 B   |   |
| Dados do ensaio:<br>Início: 22/12/08      Término: 23/12/08      Responsável: Andrea B. G. Bonassoli.   |   |
| /s  |   |
| Curitiba, 12 de janeiro de 2009   |   |
| <br>Emiliang Borges<br>Gerente Técnica<br>CRQ 09100126   |   |
| <br>Jackeline Taveira Cangussú<br>CRQ 09200768 – 9ª Região<br>Coordenadora do Laboratório  |   |
| OBSERVAÇÃO: • A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO CEPPA.<br>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.<br>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO. |   |

|  |        |
|--|--------|
| <br><b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ</b><br>SETOR DE TECNOLOGIA<br><b>CEPPA - CENTRO DE PESQUISA E PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS</b><br>CENTRO POLITÉCNICO - PRÉDIO DAS USINAS PILOTO - BLOCO B - SALA PP01<br>CX. P. 19.083 - FONES: (41) 3366-3668 / 3361-3195 - FAX: (41) 3266-1647<br>e-mail: ceppa@ufpr.br - www.ceppa.ufpr.br - CEP 81531-990 - CURITIBA - PARANÁ |        |
| <b>CERTIFICADO DE ANÁLISE</b> Nº 114845  |        |
| PRODUTO: POLÍMERO COM CHUMBO – SOLUBILIZADO – POLI 40<br>FABRICANTE/PRODUTOR: ---X---<br>SOLICITANTE: Frieda Saicla Barros<br>ENDEREÇO: Rua Bonifácio Batista Ribas, 361 Barreirinha - Curitiba/PR<br>PROTOCOLO DE RECEPÇÃO DE AMOSTRA Nº 2030 – 22/12/08<br>AMOSTRA Nº 5969/08  |        |
| <b>RESULTADOS</b> <span style="float: right;">01/01</span>   |        |
| Descrição do produto: amostra recebida sob temperatura ambiente, acondicionada em 01 frasco plástico opaco com volume aproximado de 100 mL.  |        |
| <b>PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS</b>   |        |
| Chumbo (mg/L)  | 104,50 |
| REFERÊNCIAS<br>STANDARD methods for examination of water and wastewater 21 <sup>st</sup> edition, 2005. Chapter 3000, p. 3-17 – 3-19; method 3111 B  |        |
| Dados do ensaio:<br>Início: 22/12/08      Término: 23/12/08      Responsável: Andrea B. G. Bonassoli.  |        |
| <br>Emília Borges<br>Gerente Técnica<br>CRQ 09100126  |        |
| /s<br><br>Curitiba, 12 de janeiro de 2009  |        |
| <br>Jackeline Taveira Cançussu<br>CRQ 09200768 – 9ª Região<br>Coordenadora do Laboratório   |        |
| OBSERVAÇÃO: • A PRESENTE ANÁLISE TEM SEU VALOR RESTRITO A AMOSTRA RECEBIDA PELO CEPPA.<br>• AS INFORMAÇÕES CONSTANTES NESTE CERTIFICADO DE ANÁLISE SÃO CONFIDENCIAIS E PERTENCENTES AO SOLICITANTE.<br>• É PERMITIDA A REPRODUÇÃO, DESDE QUE INTEGRALMENTE E SEM NENHUMA ALTERAÇÃO.  |        |



### CERTIFICADO DE ANÁLISE

PRODUTO Borracha de Silicone N-2 Branca  
 REFERÊNCIA 0694010 (03/06/09)  
 VALIDADE 12 meses

| ANÁLISE  | ESPECIFICAÇÃO              |        | RESULTADO |
|--|----------------------------|--------|-----------|
|  | MÍNIMO                     | MÁXIMO |           |
| Aspecto  | Líquido viscoso cor branca |        | Conforme  |
| Viscosidade (cPs)                                  | 15.000                     | 25.000 | 20.000    |
| Tempo de trabalho (min),<br>3 % catalisador rápido | 15                         | 40     | 18        |
| Tempo de desmoldagem (hs)                          | 8                          | 24     | 8         |
| Dureza (Shore A), após 24 hs,<br>vulcanizado       | 14                         | 20     | 16        |

Obs.: ensaios realizados a 25°C



ARA QUÍMICA S/A – RUA ARTHUR CIBAR, 200  
18147-000 – ARAÇARIGUAMA – SP – BRASIL • TEL: 0 (XX) 11 4136 6477

# BOLETIM TÉCNICO COMMODITIES

## ARAZYN 1.0 - BOLETIM TÉCNICO DA FAMÍLIA

### RESINA POLIÉSTER INSATURADO, ORTOFTÁLICA, BAIXA REATIVIDADE, CRISTAL:

#### DESCRIÇÃO:

A resina padrão da família ARAZYN® 1.0 é pré-acelerada, possui alta transparência e ausência de coloração. Após cura, apresenta rigidez, alta transparência e cristalinidade.

#### OUTRAS RESINAS

Na mesma família, existem outras resinas com características específicas quanto à viscosidade, absorção de raios UV, tixotropia, pigmentação, Consultar o departamento técnico da ARA ASHLAND.

#### SUGESTÕES DE USO

Fundição de artesanato, decoração e construção civil (painéis, vitrais, tampos de mesa, bijuterias, estátuas, troféus, assentos sanitários e lavatórios), além de botões centrifugados e laminados translúcidos.

#### PROPRIEDADES DA RESINA LÍQUIDA AZ 1.0 - Padrão

|  |         |
|--|---------|
| Viscosidade Brookfield(25°C/LVF sp 2/12 rpm) , cps       | 1600    |
| Gel Time ( 25°C c/ 1,0 g MEK-P em 100 g resina), minutos | 14      |
| Intervalo de Pico, minutos                               | 22      |
| Pico Exotérmico, °C                                      | 150     |
| Índice de Acidez (em solução), mg KOH/g resina           | 30      |
| Aspecto  | cristal |
| Cor(curada)  | incolor |
| Teor de Sólidos, %                                       | 68 %    |

*OBS: Os valores das propriedades acima obtidos resultam da resina AZ 1.0 na sua forma original (padrão) Qualquer produto adicionado à mesma, afetará tais valores. O catalisador (MEK-P) usado, possui teor de oxigênio ativo de 8,9 a 9,1% e umidade máxima de 3%.*

*CURA: Usar MEK-P como catalisador num teor que pode variar de 0,6 a 2,0%. A escolha do teor de MEK-P está diretamente ligada à espessura e volume da peça, bem como à temperatura ambiente.*

®Marca registrada da Ara Química S. A.

#### EMBALAGEM PADRÃO:

Tambor não retornável com 220 kg (peso líquido)

#### IDENTIFICAÇÃO REQUERIDA:

Líquido inflamável

#### CÓDIGO:

AZ 1.0#00 (padrão)

AZ 1.0#XX (outras resinas da mesma família)

Nota: Os dados e resultados de laboratório contidos neste boletim foram determinados pela Ashland através de métodos de análise específicos. A Ara Química/Ashland não garante a duplicação destes resultados por terceiros. Todos os dados apresentados são fornecidos de boa fé e, tendo a intenção de ser precisos. Os valores são orientativos e todas as recomendações ou sugestões contidas ou baseadas neste boletim deverão ser avaliadas pelo cliente a fim de determinar a aplicabilidade ou adequação para seu uso particular.

Todas as etiquetas e notas de precaução devem ser lidas e entendidas pelo cliente. Consulte a Ara Química e as regulamentações oficiais para maiores informações adicionais sobre segurança e saúde no manuseio do produto. O cliente é responsável por estar em acordo com a aplicabilidade das leis federais, estaduais ou municipais e regulamentos que cubram o uso do produto. Deve-se dar maior atenção às aplicações do consumidor final. A liberdade de uso de qualquer patente pertencente a Ashland ou outros não está incluída neste documento.